

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Konstrukční návrh kola s aktivním zatáčením

Mechanical Design of a Wheel with Active Steering

Student:

Bc. Zdeněk Zeman

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Robert Pastor

Ostrava 2019

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zdeněk Zeman**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T013 Robotika  
Téma: **Konstrukční návrh kola s aktivním zatáčením**  
**Mechanical Design of a Wheel with Active Steering**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky.
2. Specifikace požadavkového listu
3. Návrh variant řešení.
4. Rozpracování vybrané varianty. Popis použitých komponentů a jejich umístění v konstrukci.
5. Práci doplňte podrobnou technickou a výpočtovou dokumentací. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce.
6. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Kárník, L., Knoflíček, R., Marcinčin, J. N. Mobilní roboty. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 2000. 210 s. ISBN 80-902746-2-5.
2. Schraft, R.F., Volz, H. Serviceroboter. Springer – Verlag, Berlin, 1996.
3. Kárník, L. Robotizace v nestrojírenských oborech. VŠB-TUO, Ostrava, 2000, 66 s. ISBN 80-7078-739-2.
4. ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
5. ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Robert Pastor**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
prof. Dr. Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20.05.2019

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.05.2019

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Zdeněk Zeman

Adresa trvalého pobytu autora práce:

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

ZEMAN, Z. *Konstrukční návrh kola s aktivním zatáčením* : diplomová práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Robotiky, 2019, 92 s. Vedoucí práce: Ing. Robert Pastor

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem kola s aktivním zatáčením pro mobilní robot RoverOva K3P4, který je určen pro studentskou soutěž European Rover Challenge Student. V úvodu práce je proveden rozbor úkolů soutěže a zhodnocen aktuální stav kola robotu. Následně byl ze zjištěných poznatků vytvořen požadavkový list a tři varianty konstrukce kola. Optimální varianta byla podrobněji zpracována, doplněna o 3D model v programu Creo Parametric 4, pevnostními analýzami nosných částí a výkresovou dokumentací dle požadavků vedoucího práce.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

ZEMAN, Z. *Mechanical Design of a Wheel with Active Steering* : Master Thesis. Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2019, 92 p. Thesis head: Ing. Robert Pastor

Thesis deals with construction design of a wheel with active steering for the mobile robot RoverOva K3P4, which is designed for the student competition European Rover Challenge Student. At the beginning of the thesis, the tasks of the competition are analyzed, and the current state of the robot wheel is evaluated. Subsequently, a requirement list and three variants of the wheel design were created from the findings. The optimal variant has been elaborated in more detail, completed by a 3D model in Creo Parametric 4, strength analysis of supporting parts and drawing documentation to the requirements of the thesis supervisor.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Robertu Pastorovi a členovi týmu RoverOva Ing. Aleši Vysockému, za cenné rady a připomínky k mé práci. Diplomová práce prezentuje znalosti nabyté v rámci řešení projektů: „Adaptabilita robotických systémů“, reg. č.: „SP2018/86“ a „Výzkum a vývoj robotických systémů“, reg. č.: „SP2017/143“ financovaných ze státního rozpočtu České Republiky, na kterých jsem se v průběhu magisterského studia podílel.

# Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam použitého značení a termínů .....</b>	<b>13</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Analýza současného stavu .....</b>	<b>16</b>
1.1 Mars rovery NASA.....	16
1.2 European Rover Challenge.....	18
1.2.1 Vědecká úloha.....	19
1.2.2 Servisní úloha.....	20
1.2.3 Pomocná úloha.....	20
1.2.4 Jízdní úloha .....	21
1.3 RoverOva K3P4.....	22
1.3.1 Aktuální stav konstrukce 2DF kola roveru K3P4 .....	23
<b>2 Požadavkový list .....</b>	<b>27</b>
<b>3 Předběžný výpočet pro návrh pohonů kola a rotace .....</b>	<b>28</b>
3.1 Výpočet pro návrh pohonu kola .....	28
3.1.1 Pohyb po rovině .....	28
3.1.2 Pohyb po nakloněné rovině.....	30
3.1.3 Překonání překážky tvaru kvádr .....	33
3.1.4 Výsledné hodnoty pro návrh pohonu kola .....	36
3.2 Výpočet pro návrh pohonu svislé rotace .....	36
3.2.1 Výpočet pro svislou rotaci kola .....	36
3.2.2 Měření momentu svislé rotace kola .....	38
3.2.3 Výsledné hodnoty pro návrh pohonu svislé rotace .....	39
<b>4 Varianty řešení .....</b>	<b>40</b>
4.1 Varianta A .....	40
4.1.1 Varianta A – kolo.....	41
4.1.2 Varianta A – svislá rotace .....	46
4.2 Varianta B.....	50
4.2.1 Varianta B – kolo .....	50
4.2.2 Varianta B – svislá rotace .....	55

4.3	Varianta C.....	57
4.3.1	Varianta C – kolo .....	58
4.3.2	Varianta C – svislá rotace .....	63
<b>5</b>	<b>Hodnocení variant a výběr optimální varianty .....</b>	<b>64</b>
5.1	Hodnocená kritéria .....	64
5.2	Stupnice hodnocení .....	64
5.3	Metoda trojúhelníkových párů .....	65
5.4	Hodnocení variant .....	65
5.4.1	Hodnocení variant kola .....	66
5.4.2	Hodnocení variant svislé rotace .....	67
5.5	Vítězná varianta.....	67
<b>6</b>	<b>Konstrukční řešení zvolené varianty .....</b>	<b>68</b>
6.1	Konstrukce celku kola se svislou rotací .....	70
6.2	Konstrukce paralelogramu.....	71
6.3	Konstrukce svislé rotace.....	72
6.4	Konstrukce sloupku kola .....	74
6.5	Konstrukce kola.....	76
<b>7</b>	<b>Hardwarová struktura vybrané varianty .....</b>	<b>77</b>
7.1	Popis zvolených komponent.....	79
7.1.1	Motor kola.....	79
7.1.2	Převodovka pohonu kola.....	80
7.1.3	Driver pro motory kola .....	81
7.1.4	Motor svislé rotace.....	82
7.1.5	Převodovka svislé rotace.....	82
7.1.6	Driver pro motory svislé rotace .....	83
7.1.7	Potenciometry .....	84
7.1.8	Řídící jednotka .....	84
7.1.9	Akumulátor .....	86
7.2	Trasy pro vedení kabeláže .....	87
7.3	Schéma zapojení.....	88
<b>8</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>89</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>90</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>92</b>



## Seznam obrázků

Obr. 1 – Curiosity Mars rover [1] .....	16
Obr. 2 – Mars rovery NASA (Zleva Spirit, Sojourner, Curiosity) [1].....	17
Obr. 3 – Odpružení typu Rocker-Bogie [6] .....	18
Obr. 4 – Soutěž ERC Student 2018 [7].....	19
Obr. 5 – Odběr vzorku typu kámen [7].....	19
Obr. 6 – Obsluha elektrického panelu [5].....	20
Obr. 7 – Sběr vzorků ze země [5] .....	21
Obr. 8 – Navigace podle milníků [5] .....	22
Obr. 9 – RoverOva K3P4 [5] .....	22
Obr. 10 – Render modelu roveru RoverOva K3P4 [5] .....	23
Obr. 11 – Řez svislé rotace RoverOva K3P4.....	24
Obr. 12 – Řez kola RoverOva K3P4.....	25
Obr. 13 – Schéma působení sil při pohybu po rovině.....	28
Obr. 14 – Schéma působení sil při pohybu po nakloněné rovině [8].....	30
Obr. 15 – Schéma působení sil pro překonání překážky tvaru kvádr .....	33
Obr. 16 – Schéma působení třecích sil při svislé rotaci kola .....	36
Obr. 17 – Prototyp kola pro měření potřebného momentu pohonu svislé rotace .....	38
Obr. 18 – Schéma základních parametrů pro měření na prototypu kola .....	38
Obr. 19 – Varianta A.....	40
Obr. 20 – Uložení pohonu kola varianty A.....	41
Obr. 21 – Kolo varianta A .....	42
Obr. 22 -Momentová charakteristika motoru MAXON EC 45 flat [10] .....	45
Obr. 23 – Osa šnekového kola převodovky varianty A .....	46
Obr. 24 – Osa šneku převodovky varianty A.....	47
Obr. 25 - Připojení svislé rotace k paralelogramu .....	48
Obr. 26 – Varianta B.....	50
Obr. 27 – Kolo varianta B.....	51
Obr. 28 - Momentová charakteristika motoru MAXON EC 45 flat [10] .....	54
Obr. 29 – Svislá rotace varianta B .....	55

---

Obr. 30 – Varianta C .....	57
Obr. 31 – Uložení pohonu kola varianta C .....	58
Obr. 32 – Kolo varianta C.....	59
Obr. 33 – Momentová charakteristika motoru Maxon RE 40 [10].....	62
Obr. 34 – Svislá rotace varianta C .....	63
Obr. 35 – Momentová charakteristika motoru MAXON EC 45 flat [10].....	68
Obr. 36 – Kompletní 3D model kola napojeného na rám .....	69
Obr. 37 – Konstrukce celku kola se svislou rotací .....	70
Obr. 38 – Paralelogram .....	71
Obr. 39 – Řez kloubem paralelogramu .....	72
Obr. 40 – Svislá rotace.....	73
Obr. 41 – Řez uložením motoru svislé rotace.....	73
Obr. 42 – Řez sestavou potenciometru .....	74
Obr. 43 – Sloupek kola .....	75
Obr. 44 – Řez uložením pohonu kola .....	75
Obr. 45 - Kolo .....	76
Obr. 46 – Umístění modulů elektroniky v rámu roveru .....	77
Obr. 47 – Modul elektroniky podvozku.....	78
Obr. 48 – Modul battery managementu.....	78
Obr. 49 – Maxon EC 45 flat [10].....	79
Obr. 50 – Maxon GP 42 C [10] .....	80
Obr. 51 – Kontrolér ESCON 36/3 [10].....	81
Obr. 52 – Pololu 37D x 54L [15].....	82
Obr. 53 – Převodovka IGUS RL D 30 [14] .....	82
Obr. 54 – Driver TB9051FTG [20] .....	83
Obr. 55 – Potenciometr AS5040-EK-AB-ND [13] .....	84
Obr. 56 – Arduino Mega 2560 [22] .....	84
Obr. 57 – Sensor shield pro Aruino Mega 2560 [21] .....	85
Obr. 58 – Akumulátor LiPo Rc 6S 22,2V 10Ah [23] .....	86
Obr. 59 – Trasy pro vedení kabeláže .....	87
Obr. 60 – Schéma zapojení .....	88

---

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Požadavkový list.....	27
Tab. 2 – Pohyb po rovině.....	28
Tab. 3 – Pohyb po nakloněné rovině .....	30
Tab. 4 – Překonání překážky tvaru kvádr .....	34
Tab. 5 – Výsledné hodnoty výpočtu pro návrh pohonu kola.....	36
Tab. 6 – Svislá rotace kola.....	37
Tab. 7 – Výsledné hodnoty výpočtu pro návrh pohonu kola.....	39
Tab. 8 – Parametry kola varianty A .....	43
Tab. 9 – Kontrola motoru kola varianty A.....	44
Tab. 10 – Parametry svislé rotace varianty A .....	48
Tab. 11 – Kontrola motoru svislé rotace varianty A.....	49
Tab. 12 – Parametry kola varianty B .....	52
Tab. 13 – Kontrola motoru kola varianty B.....	53
Tab. 14 – Parametry svislé rotace varianty B .....	56
Tab. 15 – Kontrola motoru svislé rotace varianty B.....	56
Tab. 16 – Parametry kola varianty C .....	60
Tab. 17 – Kontrola motoru kola varianty C.....	61
Tab. 18 – Parametry svislé rotace varianty C .....	63
Tab. 19 – Hodnocená kritéria .....	64
Tab. 20 – Stupnice hodnocení.....	64
Tab. 21 – Významnost kritérií .....	64
Tab. 22 – Metoda trojúhelníkových párů.....	65
Tab. 23 – Hodnocení variant kola.....	66
Tab. 24 – Hodnocení variant svislé rotace.....	67
Tab. 25 – Hodnoty pro kontrolu motoru vybrané varianty .....	68
Tab. 26 – Mechanické vlastnosti ČSN 42 4401 T66 .....	71
Tab. 27 – Parametry motoru Maxon EC 45 flat [10].....	79
Tab. 28 – Parametry převodovky Maxon GP 42 C [10] .....	80
Tab. 29 – Parametry kontroléru ESCON 36/3 [10] .....	81
Tab. 30 – Parametry motoru Pololu 37D x 54L [15].....	82

---

Tab. 31 – Parametry IGUS RL D 30 [14] .....	83
Tab. 32 – Parametry driveru TB9051FTG [20] .....	83
Tab. 33 – Parametry potenciometru AS5040 [13] .....	84
Tab. 34 – Parametry Arduino Mega 2560 + Shield [22] .....	85
Tab. 35 – Parametry akumulátoru LiPo Rc 6S 22,2V 10Ah [23] .....	86

## Seznam použitého značení a termínů

Symbol	Význam	Jednotka
$m$	Hmotnost	[kg]
$g$	Tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$v$	Rychlost	[m/s]
$a$	Zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$r_K$	Poloměr kola	[m]
$f_K$	Součinitel valivého odporu	[-]
$\vartheta$	Součinitel vlivu rotačních částí	[-]
$f_T$	Součinitel smykového tření	[-]
$O_f$	Valivý odpor	[-]
$O_z$	Odpor zrychlení	[-]
$F_K$	Celkový jízdní odpor	[-]
$P$	Hnací výkon	[W]
$M_K$	Krouticí moment	[Nm]
$n$	Otáčky	[ot/min]
$D_{kv}$	Průměr kola	[m]
$\Phi$	Úhel stoupání	[°]
$G_R$	Tíhová síla	[N]
$F_d$	Setrvačná síla	[N]
$R_{Kz}$	Reakční síla na zadním kole	[N]
$R_{Kp}$	Reakční síla na předním kole	[N]
$M_{Kp}$	Potřebný krouticí moment na předním kole	[Nm]
$M_{Kz}$	Potřebný krouticí moment na zadním kole	[Nm]
$H$	Výška překážky	[m]
$L$	Osová vzdálenost mezi koly	[m]

---

$\omega$	Uhlová rychlost	[°/sec]
$\vartheta$	Součinitel vlivu rotačních částí kola	[-]
$F_t$	Třecí síla	[N]
$M_T$	Třecí moment	[N]
$i$	Převodový poměr	[-]
$\mu_p$	Účinnost převodovky	[-]
$\mu_l$	Účinnost ložiska	[-]
$\mu_{oz}$	Účinnost ozubení	[-]

PLA (Polylactic acid)

Termoplast vhodný pro 3D tisk

TPU (Thermoplastic polyurethane)

Flexibilní termoplas vhodný pro 3D tisk

FDM (Fused Deposition Modeling)

Technologie aditivní výroby

LiPo (Lithium-Polymer)

Lithium-Polymerový akumulátor

## Úvod

Řešeným tématem diplomové práce je konstrukční návrh kola s aktivní rotací určeného pro mobilní robot typu Mars Rover do soutěže European Rover Challenge (ERC). Jedná se o mezinárodní studentskou soutěž roverů v simulovaném prostředí povrchu planety Mars.

Hlavním úkolem kola je bezproblémové překonání simulovaného terénu skládajícího se především z písku, hlíny a kamení, a také zajistit dobrou manévrovatelnost pro pozicování roveru při vykonávání dílčích úloh jako je např. sběr vzorků.

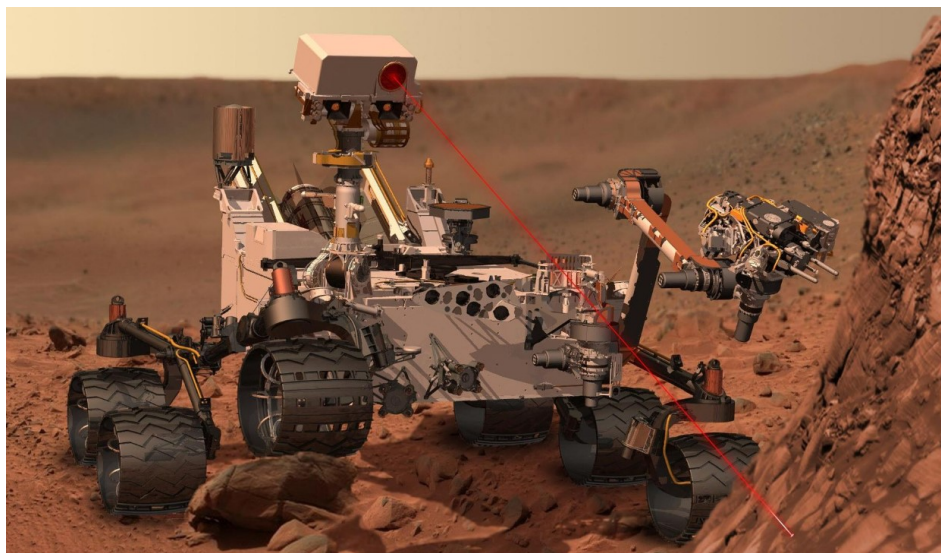
Při konstrukci jakéhokoliv extraterestiálního vozítka se klade velký důraz na hmotnost, energetickou spotřebu, spolehlivost a jednoduchost konstrukce. Mars rovery pro studentské soutěže nejsou výjimkou. Celková hmotnost roveru je bodována a neměla by překročit hodnotu 50 Kg. Důvod proč se klade velký důraz na celkovou hmotnost roveru je skutečnost, že v realitě musíme rover vynést ze zemského povrchu na povrch planety vzdálené 54,6 milionu kilometrů daleko. Kdy vynést pouhý 1 Kg váhy na nízkou orbitu naší planety pomocí rakety NASA Solar Orbiter může stát až 300 000 Kč.

Když už se nám povede dostat robot na povrch Marsu, musíme počítat s tím, že každá sebemenší závada na roveru může být kritická, jelikož ji už na tak velkou vzdálenost nebudeme schopni opravit. Z tohoto důvodu by měla být konstrukce co nejjednodušší a nejspolehlivější, aby se eliminoval co největší počet možných závad, které by mohly v průběhu mise roveru nastat. Na soutěži musí tedy rover vykonat veškeré úlohy bez kontaktu s obsluhou. Při dotyku obsluhy s robotem provádějícím danou úlohu přijde tým o veškeré body z dané úlohy a musejí ji vykonat znovu.

## 1 Analýza současného stavu

Mars rover je autonomní motorové vozidlo, které po přistání na planetě prozkoumává její povrch. Rovery mají oproti stacionárním přistávacím zařízením hned několik výhod: prozkoumají více území a mohou být nasměrováni na zajímavé rysy v okolí, mohou se umístit do slunečných poloh, aby mohli přečkat zimní měsíce, a posouvají kupředu naše znalosti o tom, jak provádět velmi vzdálené řízení robotických vozidel. [1]

Mars rover je v podstatě robotická pojízdná geologická laboratoř. Po vysazení na povrchu planety je zcela nezávislý na přistávací konstrukci. Účelem Mars roverů je hledat důkazy starověkého života, stejně jako starověké vody včetně plání, které mohly být zanechány po starých řekách nebo jezerech, které mohly být obývané. Hledání důkazů o obyvatelnosti a výskytu organického uhlíku na Marsu je nyní primárním cílem NASA. [2]

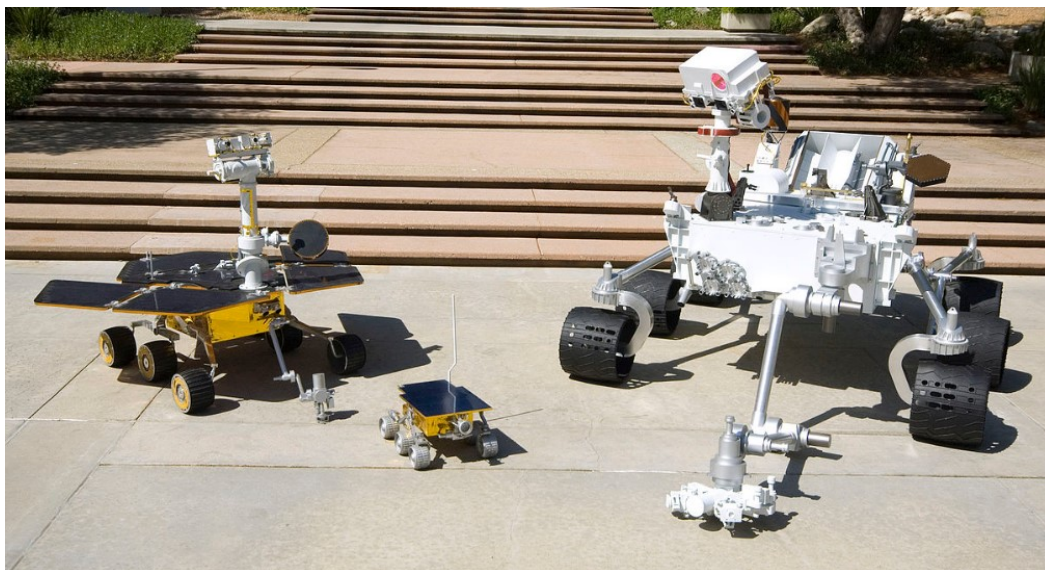


Obr. 1 – Curiosity Mars rover [1]

### 1.1 Mars rovery NASA

Dosud byly na Mars vyslány úspěšně čtyři autonomně provozované Mars rovery. Laboratoř Jet Propulsion řídila misi Mars Pathfinder a nyní neaktivní Sojourner rover. V současné jsou dále aktivní mise Mars Exploration Rover s rovery Spirit a Opportunity, a jako součást mise Mars Science Laboratory je rover Curiosity. [2]

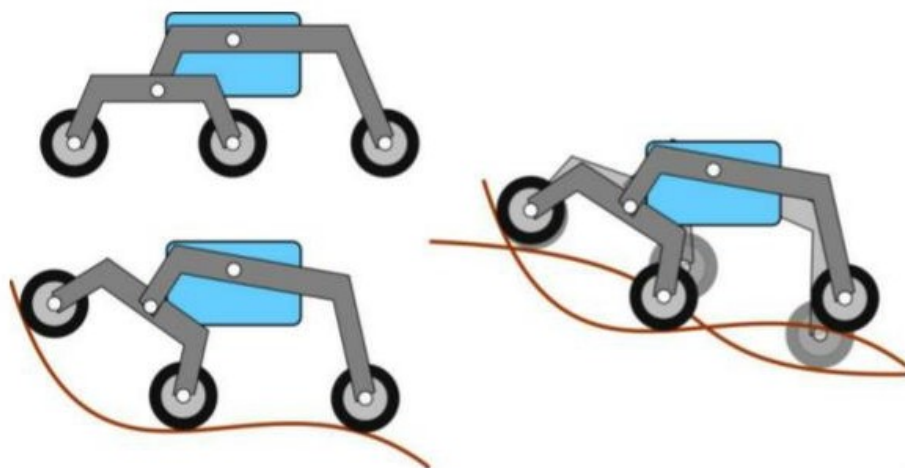




Obr. 2 – Mars rovery NASA (Zleva Spirit, Sojourner, Curiosity) [1]

Tři typy roverů, které přistály na Marsu, aby úspěšně prozkoumaly jeho povrch, byly vyvinuty v NASA. Všechny tři rovery mají zavěšovací systém šestikolového kolébkového podvozku, který vynalezl Donald Bickler. Kolébkový podvozek využívá možnosti lezení jako jeho předchůdce, Pantografové odpružení, ale zvyšuje schopnost roveru překonávat rázy. Stejně jako u pantografu umožňuje toto odpružení roverům překonat překážky o 50% větší než průměr kola. Rover musí mít dostatek trakce od svých zadních kol, aby se přední kola posunuly proti překážce dostatečnou silou a následně mohly vyšplhat. Obvykle čtyřkolový rover nemůže vylézt překážky větší než poloměr kola, protože zadní kola nemají dostatek trakce. Bez trakce se kola sklouznou a nedojde k dostatečnému dopřednému tahu, aby přední kola zůstala v kontaktu s překážkou. Závěs kolébkového podvozku může překonat překážky na hlavě, které jsou větší než průměr kola, protože používá další sadu kol pro lepší dopředný pohyb. Extra kola také snižují normálovou sílu na každém kole přibližně o  $1/6$  hmotnosti roveru. Je zapotřebí menšího dopředného tahu, protože přední kola musí zvednout pouze  $1/3$  hmotnosti roveru. Společně mají zadní čtyři kola dostatečnou přilnavost, aby udržely rover v prokluzu. [3]

Svislá rotace u těchto roverů (kromě Sojourneru) je tvořena harmonickou převodovkou značky Harmonic Drive. Motory v kolech všech roverů jsou EC motory od výrobce Maxon motor.



Obr. 3 – Odpružení typu Rocker-Bogie [6]

## 1.2 European Rover Challenge

European Rover Challenge (ERC) je integrovaný program technologického rozvoje, konkrétně v oblasti průzkumu a využití ve vesmíru. Cílem ERC je stát se silnou profesionální platformou pro rozvoj a standardizaci zkušebních testů a měřítek pro meziplanetární robotické aktivity. European Rover Challenge vlastní Evropská vesmírná nadace (European Space Foundation), která soutěž organizuje ve spolupráci se skupinou nezávislých odborníků a společností Mars Society Polska. [4]

Jednou z hlavních částí ERC je ERC-Student. Jedná se o soutěž mezi univerzitními projekty, kde týmy staví roboty, uzpůsobené k soutěži v aréně inspirované povrchem planety Mars. To znamená že soutěžní úkoly představují podobnou problematiku, jaká se řeší v dnešním průmyslu kosmické robotiky. Hlavním účelem soutěže je neustálá snaha vychovávat další generaci vesmírných inženýrů, podporovat inovace ve výzkumu a obchodu a popularizovat pokrok v oblasti technologií STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). [4]

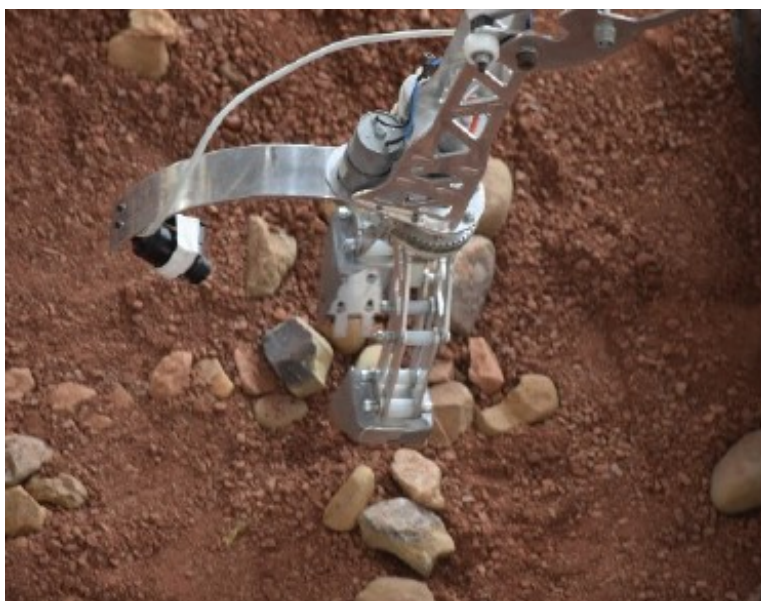
Samotná soutěž se kromě technické dokumentace v podobě hlášení ve formátu předepsaném pravidly soutěže skládá ze čtyř terénních testů v podobě následujících úloh.



Obr. 4 – Soutěž ERC Student 2018 [7]

### 1.2.1 Vědecká úloha

Pro každou vědeckou nebo průzkumnou misi musí být rover schopen odebrat vzorky půdy z různých geologických vrstev a měřit jejich vlastnosti. Rover by měl tedy odebrat vzorek půdy, posoudit kvalitu vzorku a uložit jej do připravených nádob. Ty by měly vzorky izolovat tak, aby byly uchovávány v podmínkách podobných těm původním, a to z důvodu, že podmínky laboratorní se mohou drasticky lišit od podmínek prostředí ve kterém byl vzorek odebírán, a to by mohlo vést ke kontaminaci. [4]

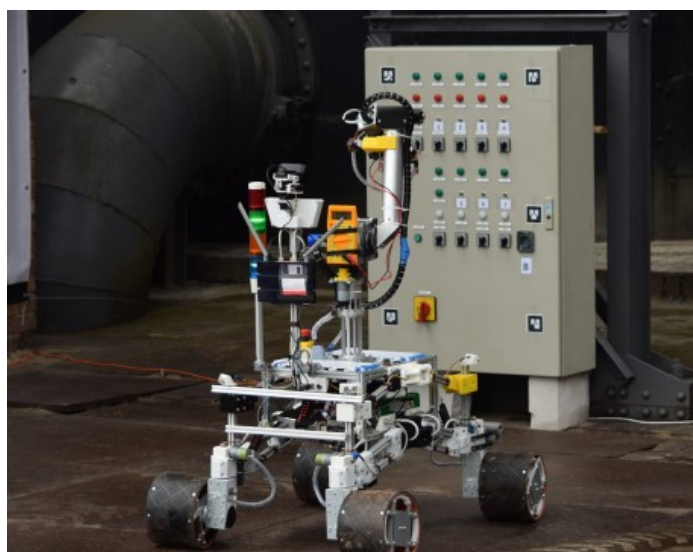


Obr. 5 – Odběr vzorku typu kámen [7]



### 1.2.2 Servisní úloha

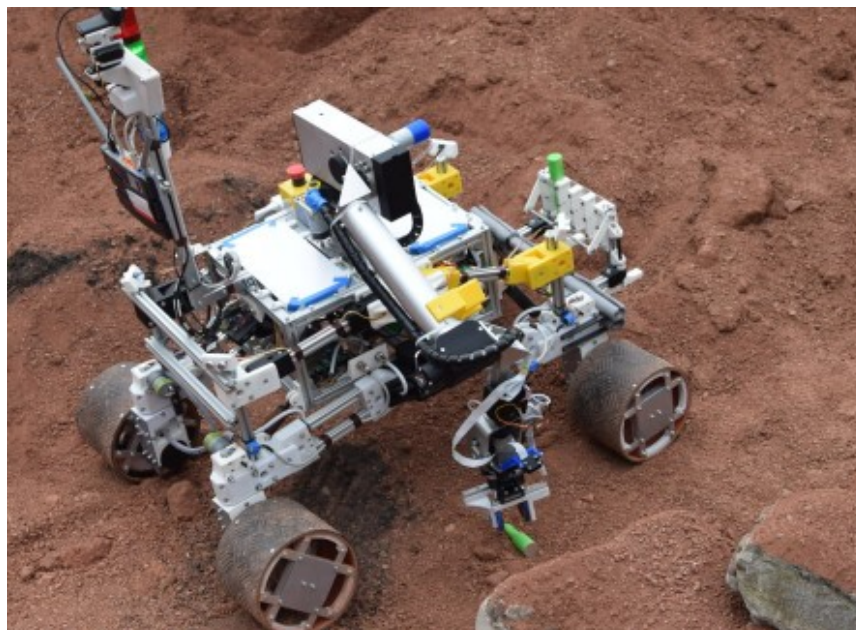
Většina misí s posádkou se snaží omezit lidskou činnost mimo orbitální nebo povrchová stanoviště. Z tohoto důvodu astronauti potřebují obratné robotické systémy, které jsou schopny provádět operace na infrastruktuře vhodné pro provoz lidmi. Úkolem servisní úlohy je demonstrovat schopnost a výkonnost roveru v provozu elektrického panelu, na kterém je namontováno několik spínačů a dalších elektrických komponent. Tým musí využít manipulačního zařízení roveru pro nastavení přepínačů do správných pozic, měření elektrických parametrů a nastavení dalších ovládacích prvků panelu. [4]



Obr. 6 – Obsluha elektrického panelu [5]

### 1.2.3 Pomocná úloha

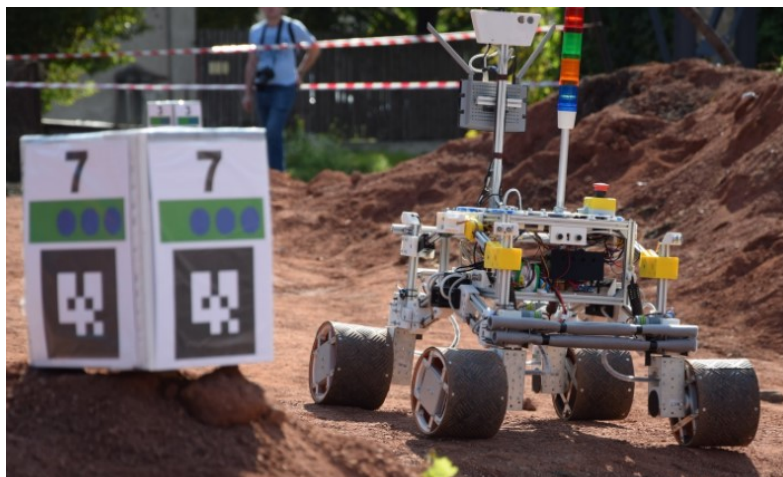
Vědecké rovery jsou cenné mobilní laboratoře a jako takové by měly být použity k prozkoumávání oblastí navržených vědci. Když je jedním z cílů mise dodávka vzorků do sofistikovanější laboratoře (nebo jejich vrácení na Zemi) jejich práce by neměla být vynaložena na doručovací činnosti, které mohou trvat značné množství času. Z tohoto důvodu byl představen koncept Sample Fetching Rover (SFR). V tomto scénáři vědecký rover nechává vzorky na zemi a jejich polohu hlásí dalšímu roveru, který se charakterizuje lepší mobilitou a je obecně rychlejší. Ten poté vzorky posbírání a doručí na odběrné místo. Tento úkol má ukázat schopnost provádět scénář vyzvedávání vzorků ze země. Rover musí dosáhnout místa označeného na mapě, vyhledat a zvednout vzorek, a ten umístit do kontejneru na palubě, a to v požadované orientaci a poté doručit kontejner se vzorky do konečného cíle. Subsystém mobility roveru by tedy měl být schopen velkého stupně manévrovatelnosti v terénu. [4]



Obr. 7 – Sběr vzorků ze země [5]

#### 1.2.4 Jízdní úloha

Jízdní úloha je základní operací, kterou musí být rover schopen vykonávat. Mělo by se jednat o plně optimalizovanou a automatizovanou aktivitu, jelikož je jízda jednou z nejkritičtějších operací a zároveň má velký dopad na celkový výkon systému. Jízda po povrchu planety, která je charakteristická podmínkami neslučitelnými se životem, a na které není možno provádět údržbu, nebo vyzvednutí roveru je velkou výzvou. Cílem tohoto úkolu je ukázat schopnost systému poloautomatického pojezdu. Tým musí vyvinout rover, který bude postupně vyvíjen do plně autonomního systému, který na své cestě shromažďuje důležitá data. V rané fázi může být systém částečně ovládán ve smyčce operátorem, ale všechny operace musí plánovat a odhadovat samotný systém roveru. To limituje operátora, aby nemohl rover řídit sám pomocí výstupů ze senzorů nebo kamer. Velice důležitou částí úlohy je mít dobrý navigační systém, který je schopen zpracovávat obrazová data pro navigaci v prostoru. Subsystem mobility roveru by měl tedy být dostatečně robustní, schopen překonávat daný terén a být co nejspolehlivější. [4]



Obr. 8 – Navigace podle milníků [5]

### 1.3 RoverOva K3P4

K3P4 je označení pro Mars rover koncept vyvíjený na naší katedře za účelem účasti na mezinárodních robotických soutěžích. Svou premiéru měl na soutěži European Rover Challenge 2018 konané v Polsku, kde se náš tým umístil na výborném 5. místě z 65 zúčastněných týmů, a jako bonus jsme obdrželi speciální cenu poroty za aktivní a pozitivní přístup a zajímavé konstrukční řešení. [5]



Obr. 9 – RoverOva K3P4 [5]

### 1.3.1 Aktuální stav konstrukce 2DF kola roveru K3P4

Subsystem mobility roveru je tvořen odpružením pomocí paralelogramu, kde je každé kolo odpruženo nezávisle na ostatních pomocí tlumiče. Svislá rotace svým tělem tvoří spodní kloub tohoto paralelogramu, které je kompletně vyrobeno z plastu pomocí technologie FDM 3D tisku. K výstupní hřídeli z převodovky svislé rotace je pak připojeno samotné kolo.

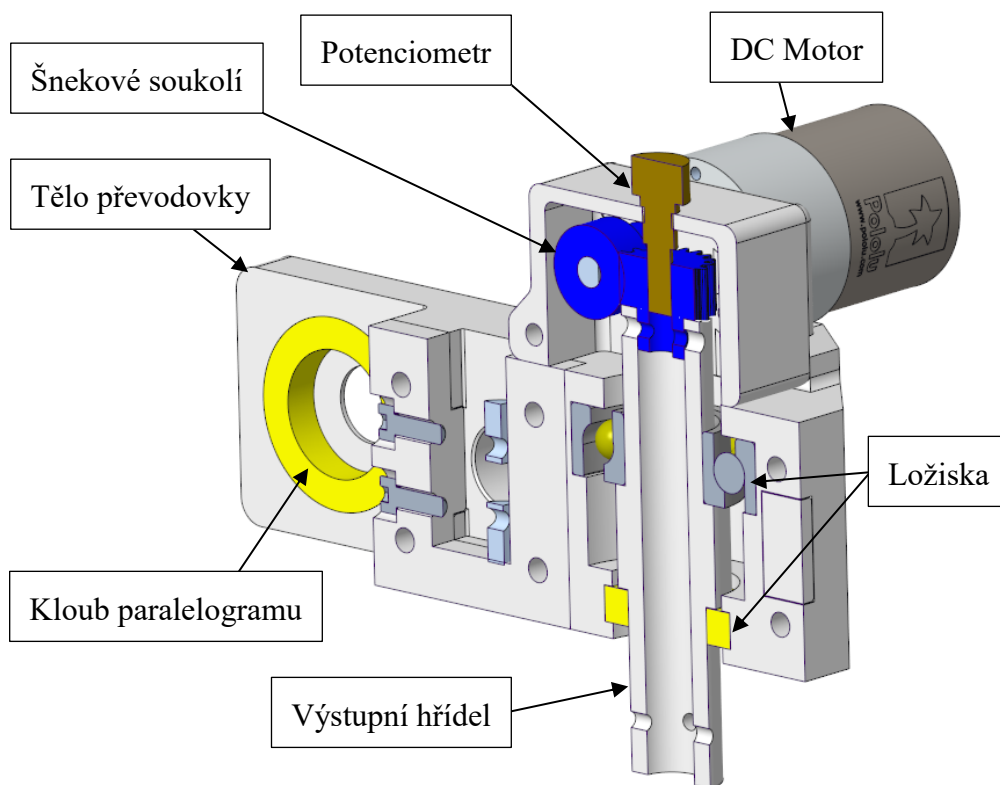


Obr. 10 – Render modelu roveru RoverOva K3P4 [5]



### 1.3.1.1 Svislá rotace roveru K3P4

Jak už bylo řečeno celé těleso svislé rotace je vyrobeno k sobě přišroubovaných tištěných plastových dílů. Samotný převod je realizován kupovaným šnekovým soukolím. Jako motor pro otáčení kolem byl zvolen DC motor od výrobce Pololu. Zpětnou vazbu pro zjištění úhlu natočení zajišťuje mechanický potenciometr nasunutý do šnekového kola.

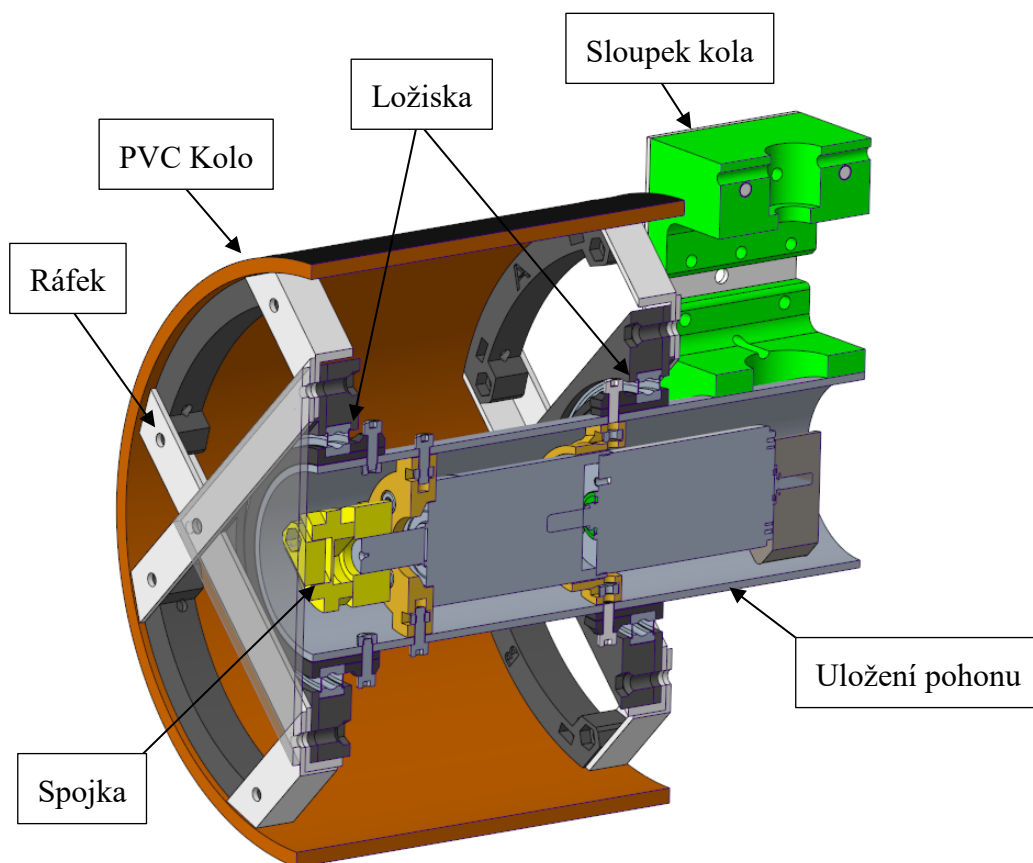


Obr. 11 – Řez svislé rotace RoverOva K3P4



### 1.3.1.2 Kolo roveru K3P4

Kolo je poháněno sestavou planetové převodovky, DC motoru a enkodéru značky Maxon motor. Pohon je umístěn uvnitř hliníkové trubky, která je z jedné strany chycena ke sloupku kola přes plastový tištěný díl. Kolo tvořené z PVC trubky, tištěných dílů a hliníkových L profilů je na trubce zajištěno přes dva kuličková ložiska. Krouťací moment z motoru na kolo je přenášen přes vyrovnávací spojku.



Obr. 12 – Řez kola RoverOva K3P4

### 1.3.1.3 Nedostatky stávající konstrukce kola roveru K3P4

Pro vývoj a zlepšování každého systému je nutno správně identifikovat vady a nedostatky jeho předchozích provedení. Při účasti na soutěži a testů v terénu byly zjištěny následující nedostatky, které by měly být v novém konstrukčním řešení kola zohledněny a odstraněny.

- Osa středu kola uložena mimo osu svislé rotace, to vytváří nežádoucí klopné momenty na paralelogram, který se poté má tendenci kroutit. Pro další varianty řešení kola by tedy měla být osa svislé rotace co nejbližší ose středu kola. Dále byla vyšetřena maximální síla, která působí v ose kola, její hodnota dosahovala maxima 80 N.
- Šnekový převod umístěný v plastovém těle má velké vůle. Natáčení kola je tedy celkem nepřesné a občas docházelo k přeskočení o jeden zub. Bylo by tedy lepší koupit hotovu převodovku, nebo kupované soukolí uložit do hliníkového těla tak, aby byly dodrženy potřebné přesnosti.
- DC motor svislé rotace byl špatně nadimenzován a docházelo k jeho přetěžování, u jednoho z motorů dokonce došlo k nevratnému poškození převodu.
- U plastových dílů v ráfku kola docházelo k praskání, bylo by tedy vhodné vyhnout se menším plastovým nosným dílům a nahradit je kovovými díly.
- Plechy tvořící sloupek kola jsou značně předimenzované, což zbytečně zvyšuje hmotnost roveru.
- Mechanické potenciometry mají omezený úhel natočení, jelikož byl převod svislé rotace nepřesný a docházelo k přeskokování mezi šnekem a šnekovým kolem, tak se mechanické potenciometry lámaly. Pro další varianty by bylo vhodné použít místo mechanických magnetické potenciometry.

## 2 Požadavkový list

Tab. 1 – Požadavkový list

Požadavek	Parametr/popis
Rozměry kola	Průměr od 150 do 250 mm
	Šířka od 100 do 180 mm
Maximální rozměry robotu (v - š - d)	600 – 800 – 1150 mm
Maximální hmotnost robotu	50 Kg
Maximální zatížení v ose kola	80 N
Maximální sklon svahu pro vyjetí	30°
Maximální výška překážky pro překonání	100 mm
Minimální rychlost	0,5 m/s
Minimální rychlost otáčení kola	10°/s
Způsob řízení pohonných jednotek	Motor pro pohyb robotu rychlostní řízení
	Motor pro natáčení kola polohové řízení
Napájení pohonu	24 V (popřípadě 12 V)
Krytí jednotek	Minimálně IP 54
Specifikace terénu	Tvrdý nebo sypký písek
	Štěrk, místy kameny

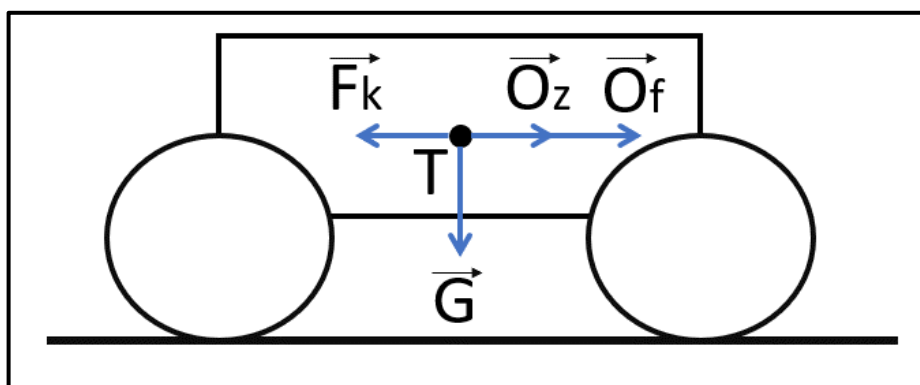
### 3 Předběžný výpočet pro návrh pohonů kola a rotace

Před návrhem variant je třeba provést návrhový výpočet pro volbu pohonů kola a svislé rotace, na kterých budou varianty vybudovány. Hodnoty nezbytné pro výpočet byly vytaženy z požadavkového listu a parametrů dosavadní konstrukce kola roveru RoverOva K3P4.

#### 3.1 Výpočet pro návrh pohonu kola

Výpočet potřebných parametrů je proveden pro čtyřkolový podvozek, kde jsou všechna kola poháněna a to pro 3 možné situace, ve kterých se rover během provozu může ocitnout. Jedná se o rozjezd na rovině, rozjezd na nakloněné rovině a překonání překážky o tvaru kvádrů.

##### 3.1.1 Pohyb po rovině



Obr. 13 – Schéma působení sil při pohybu po rovině

Tab. 2 – Pohyb po rovině

Pohyb po rovině	Značení	Hodnota
Maximální hmotnost roveru	$m$	50 kg
Tíhové zrychlení	$g$	9,8 m/s <sup>2</sup>
Maximální rychlost	$v$	0,5 m/s
Maximální zrychlení	$a$	0,3 m/s <sup>2</sup>
Poloměr kola	$r_K$	0,1 m
Součinitel valivého odporu	$f_K$	0,3 [-]
Součinitel vlivu rotačních částí	$\vartheta$	1,3 [-]
Součinitel smykového tření	$f_T$	0,8 [-]

**Výpočet valivého odporu** – Valivý odpor vzniká deformací povrchu kola a povrchu, po kterém se kolo pohybuje.

$$O_f = f_K \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0,3 \cdot 50 \cdot 9,8 \cdot \cos 0 = 147 \text{ N} \quad (3.1)$$

**Výpočet odporu zrychlení** – Jedná se o setrvačnou sílu, která působí proti zrychlení robotu.

$$O_z = \vartheta \cdot m \cdot a = 1,3 \cdot 50 \cdot 0,3 = 19,5 \text{ N} \quad (3.2)$$

**Celkový jízdní odpor** – Celková hnací síla potřebná pro překonání jízdních odporů.

$$F_K = O_f + O_z = 147 + 19,5 = 166,5 \text{ N} \quad (3.3)$$

$$F_{K1} = \frac{F_K}{4} = \frac{166,5}{4} = 41,625 \text{ N} \quad (3.4)$$

**Hnací výkon** – Potřebný výkon pro jedno kolo.

$$P_{K1} = F_{K1} \cdot v = 41,625 \cdot 0,5 = 20,812 \text{ W} \quad (3.5)$$

**Kroutící moment** – Potřebný kroutící moment na jednom kole.

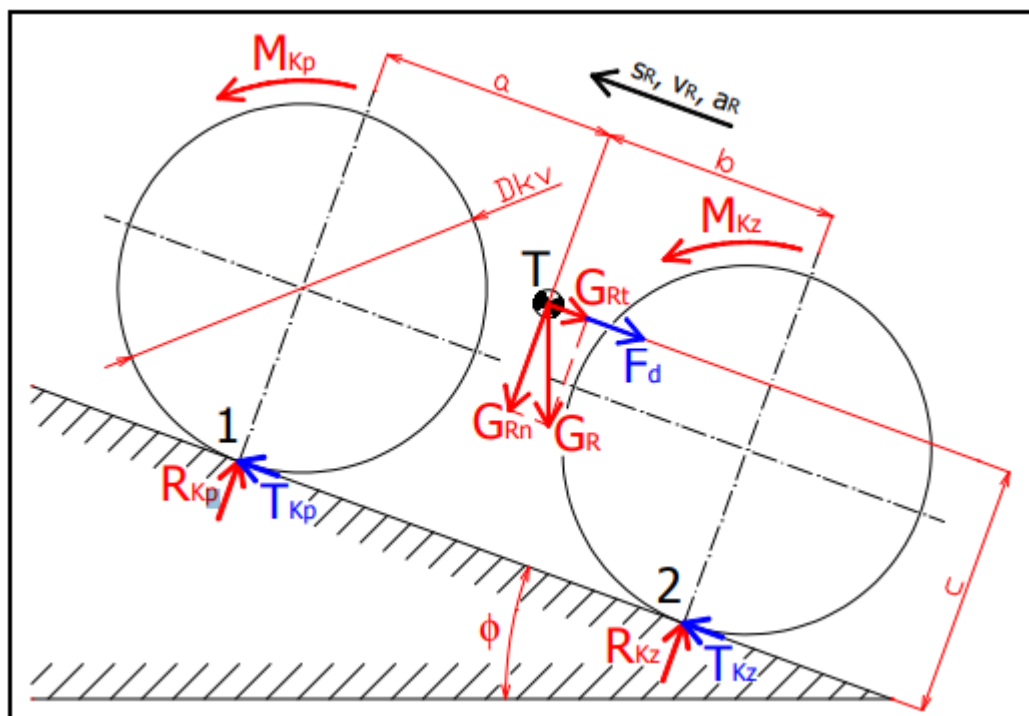
$$M_{K1} = F_{K1} \cdot r_K = 41,625 \cdot 0,1 = 4,163 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

**Potřebné otáčky** – Potřebné otáčky pro dosažení maximální rychlosti.

$$n_K = \frac{60 \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot r_K} = \frac{60 \cdot 0,5}{2 \cdot \pi \cdot 0,1} = 47,75 \text{ ot/min} \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Pohyb po nakloněné rovině

Výpočet pro pohyb po nakloněné rovině byl převzat z Disertační práce Návrh a analýza lokomočního subsystému servisního robota pro pohyb ve členitém terénu Ing. Milana Miholy Ph.D. [8]



Obr. 14 – Schéma působení sil při pohybu po nakloněné rovině [8]

Tab. 3 – Pohyb po nakloněné rovině

Pohyb po nakloněné rovině	Značení	Hodnota
Maximální hmotnost roveru	$m$	50 kg
Tíhové zrychlení	$g$	9,8 m/s <sup>2</sup>
Maximální rychlost do kopce	$v$	0,25 m/s
Maximální zrychlení do kopce	$a_k$	0,1 m/s <sup>2</sup>
Průměr kola	$D_{kv}$	0,2 m
Součinitel valivého odporu	$f_K$	0,3 [-]
Úhel stoupání	$\phi$	30 °
Součinitel smykového tření	$f_r$	0,8 [-]
Vzdálenost těžiště od země	$c$	0,4 m
Vzdálenost osy kola od těžiště	$a, b$	0,4 m

**Výpočet tíhové síly** – Tíhová síla je dána součinem poloviny hmotnosti roveru a tíhového zrychlení.

$$G_R = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 9,8 = 245 \text{ N} \quad (3.8)$$

**Výpočet dynamické síly zrychlení** – Jedná se o setrvačnou sílu, která působí proti zrychlení robotu.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot m \cdot a_k = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 0,1 = 2,5 \text{ N} \quad (3.9)$$

**Výpočet reakce  $R_{Kz}$**  – Vypočítá se z podmínky rovnováhy momentů k bodu 1 (místa kontaktů kol s nájezdovou rampou).

$$R_{Kz} \cdot (a + b) - G_{Rt} \cdot c - G_{Rn} \cdot a - F_d \cdot c = 0 \quad (3.10)$$

$$R_{Kz} = \frac{G_{Rt} \cdot c + G_{Rn} \cdot a + F_d \cdot c}{(a + b)} = \frac{G_R \cdot \sin\phi \cdot c + G_R \cdot \cos\phi \cdot a + F_d \cdot c}{(a + b)}$$

$$R_{Kz} = \frac{245 \cdot \sin 30 \cdot 400 + 245 \cdot \cos 30 \cdot 400 + 2,5 \cdot 400}{(400 + 400)} = 168,59 \text{ N}$$

**Výpočet reakce  $R_{Kp}$**  – Vypočítá se z podmínky rovnováhy momentů k bodu 2 (místa kontaktů kol s nájezdovou rampou).

$$R_{Kp} \cdot (a + b) + G_{Rt} \cdot c - G_{Rn} \cdot b + F_d \cdot c = 0 \quad (3.11)$$

$$R_{Kp} = \frac{-G_{Rt} \cdot c + G_{Rn} \cdot b - F_d \cdot c}{(a + b)} = \frac{-G_R \cdot \sin\phi \cdot c + G_R \cdot \cos\phi \cdot b - F_d \cdot c}{(a + b)}$$

$$R_{Kp} = \frac{-245 \cdot \sin 30 \cdot 400 + 245 \cdot \cos 30 \cdot 400 - 2,5 \cdot 400}{(400 + 400)} = 43,59 \text{ N}$$

**Určení kroutícího momentu na předním kole** – Vychází z normálové reakce  $R_{kp}$  vznikající v místě kontaktu předního kola a rampy. Koeficient tření mezi kolem a rampou  $\mu = 0,8$  (Pro pryž na betonovém povrchu).

$$M_{Kp} = \mu \cdot R_{Kp} \cdot \frac{D_{kv}}{2} = 0,8 \cdot 43,59 \cdot \frac{0,2}{2} = 3,49 \text{ Nm} \quad (3.12)$$

**Určení kroutícího momentu na zadním kole** – Vycházíme ze vztahu pro rovnováhu sil působících ve směru pohybu robotu, kde sílu  $T_{kp}$  nahradíme silou  $T_{kp}^*$ , vypočítanou z podílu kroutícího momentu  $M_{kp}$  a poloměru kola a určíme sílu  $T_{kz}$ , ze které dopočteme kroutící moment na zadním kole.

$$G_{Rt} + F_d - T_{Kp} - T_{Kz} = 0 \quad (3.13)$$

$$G_{Rt} + F_d - T_{Kp}^* - T_{Kz} = 0 \quad (3.14)$$

$$G_R \cdot \sin\phi + F_d - \frac{M_{Kp}}{\frac{D_{kv}}{2}} - T_{Kz} = 0$$

$$T_{Kz} = G_R \cdot \sin\phi + F_d - \frac{M_{Kp}}{\frac{D_{kv}}{2}} = 245 \cdot \sin 30 + 2,5 - \frac{3,49}{\frac{0,2}{2}} = 90,1 \text{ N} \quad (3.15)$$

$$M_{Kz} = T_{Kz} \cdot \frac{D_{kv}}{2} = 90,1 \cdot \frac{0,2}{2} = 9,01 \text{ Nm} \quad (3.16)$$

**Výpočet valivého odporu na zadním kole** – Jelikož uvažujeme že ve všech kolech robotu budou umístěny stejné motory, počítáme odpory pouze pro zadní kolo, kde nám vyšel kroutící moment vyšší. Při výpočtu se vychází z normálové reakce  $R_{kz}$  a příslušného součinitele valivého odporu  $f_k = 0,25$  (pro pryž na hlubokém písku).

$$M_{Kvo} = R_{Kz} \cdot f_k \cdot \frac{D_{kv}}{2} = 168,59 \cdot 0,25 \cdot \frac{0,2}{2} = 4,21 \text{ Nm} \quad (3.17)$$



**Výpočet celkového kroutícího momentu na zadním kole** – Celkový kroutící moment přenášený z pohonné jednotky na zadní kolo určíme ze součtů momentů  $M_{Kz}$  a  $M_{Kvo}$ . Odpor vzduchu a zrychlení při výpočtu zanedbáváme z důvodu velmi malého zrychlení robotu.

$$M_{KzC} = M_{Kz} + M_{Kvo} = 9,01 + 4,21 = 13,22 \text{ Nm} \quad (3.18)$$

**Potřebné otáčky** – Potřebné otáčky pro dosažení maximální rychlosti.

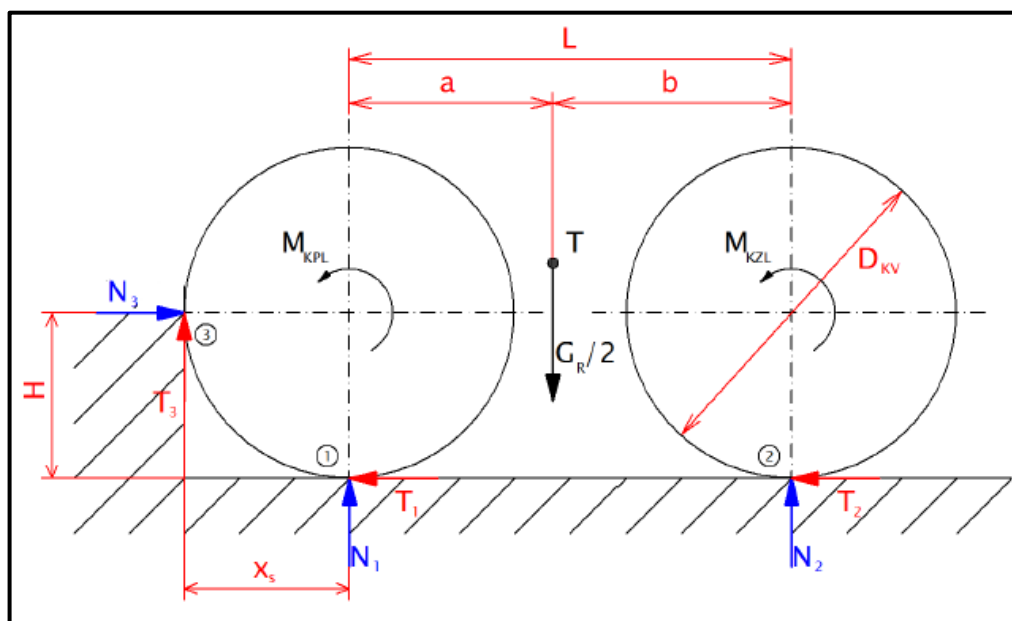
$$n_K = \frac{60 \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot r_K} = \frac{60 \cdot 0,25}{2 \cdot \pi \cdot 0,1} = 23,87 \text{ ot/min} \quad (3.19)$$

**Hnací výkon na zadním kole** – Potřebný výkon na zadním kole.

$$P_{Kz} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_{KzC} \cdot n_K}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 13,22 \cdot 23,87}{60} = 33,05 \text{ W} \quad (3.20)$$

### 3.1.3 Překonání překážky tvaru kvádr

Výpočet pro překonání překážky byl taktéž převzat z Disertační práce Ing. Milana Miholy Ph.D. [8].



Obr. 15 – Schéma působení sil pro překonání překážky tvaru kvádr

Tab. 4 – Překonání překážky tvaru kvádr

Překonání překážky tvaru kvádr	Značení	Hodnota
Maximální hmotnost roveru	$m$	50 kg
Tíhové zrychlení	$g$	9,8 m/s <sup>2</sup>
Průměr kola	$D_{kv}$	0,2 m
Úhel mezi osou kola a hranou kvádru	$\kappa$	5,74°
Výška překážky	$H$	0,1 m
Vzdálenost osy kola od hrany kvádru	$X_s$	0,1 m
Vzdálenost mezi koly	$L$	0,8 m
Vzdálenost osy kola od těžiště	$a, b$	0,4 m
Koeficient tření na překážce	$f_l$	0,825 [-]

**Výpočet tíhové síly** – Tíhová síla je dána součinem poloviny hmotnosti roveru a tíhového zrychlení.

$$G_R = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 9,8 = 245 \text{ N} \quad (3.1)$$

**Podmínka rovnováhy pro danou výšku překážky** – Podmínka rovnováhy sil je počítána k bodu 2. Z této podmínky budou vycházet všechny další výpočetní vztahy.

$$-N_3 \cdot H - T_3 \cdot (L + X_s) - N_1 \cdot L + G_R \cdot b = 0 \quad (3.21)$$

dále:

$$T_2 = N_2 \cdot f_1 \quad (3.22)$$

$$T_3 = N_3 \cdot f_2 \quad (3.23)$$

$$N_2 = 0 \text{ N}$$

$$T_1 = 0 \text{ N}$$

**Výpočet momentu na předním kole** – Výpočet momentu na předním kole, potřebného k překonání překážky.

$$T_3 = \frac{G_R \cdot b}{L + x_s} = \frac{245 \cdot 0,4}{0,8 + 0,1} = 108,9 \text{ N} \quad (3.24)$$

$$M_{Kp} = T_3 \cdot \frac{D_{kv}}{2} = 108,9 \cdot \frac{0,2}{2} = 10,89 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.25)$$

**Výpočet momentu na zadním kole** – Výpočet momentu na zadním kole, potřebného k překonání překážky.

$$N_3 = \frac{T_3}{f_1} = \frac{108,9}{0,825} = 132 \text{ N} \quad (3.26)$$

$$T_2 = N_3 = 132 \text{ N} \quad (3.27)$$

$$M_{Kz} = T_2 \cdot \frac{D_{kv}}{2} = 132 \cdot \frac{0,2}{2} = 13,2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.28)$$

### 3.1.4 Výsledné hodnoty pro návrh pohonu kola

Dle provedených výpočtů pro různé typy pohybu robotu, byly pro volbu motoru a převodovky pro pohon kola vypočteny tyto hodnoty.

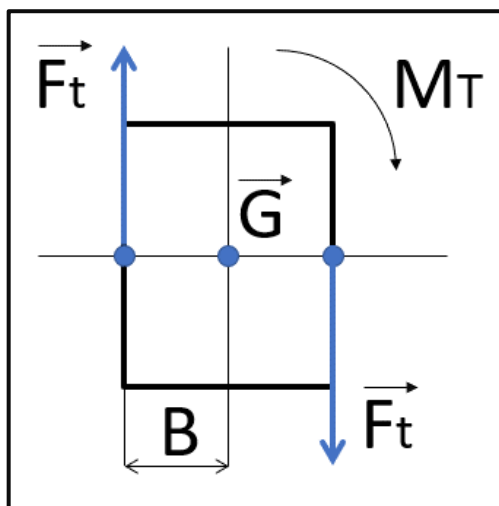
Tab. 5 – Výsledné hodnoty výpočtu pro návrh pohonu kola

Typ pohybu	Výkon na kole	Kroutící moment	Otáčky
Pohyb po rovině	20,81 W	4,16 Nm	47,75 ot/min
Pohyb po nakloněné rovině	33,05 W	13,22 Nm	23,87 ot/min
Překonání překážky	-	13,2 Nm	-

## 3.2 Výpočet pro návrh pohonu svislé rotace

Výpočty pohonných jednotek aktivních rotací jsou většinou pouze orientační a v praxi je tudíž doprovází testování na prototypech. Pro zjištění potřebných kroutících momentů pohonů byl proto krom výpočtu ještě sestaven prototyp kola a rotace, na kterém bylo provedeno měření na 3 typech povrchu.

### 3.2.1 Výpočet pro svislou rotaci kola



Obr. 16 – Schéma působení třecích sil při svislé rotaci kola

Tab. 6 – Svislá rotace kola

Svislá rotace kola	Značení	Hodnota
Maximální hmotnost na jedno kolo	$m$	20 kg
Tíhové zrychlení	$g$	9,81 m/s <sup>2</sup>
Polovina šířky kola	$B$	0,075 m
Součinitel smykového tření (pryž asfalt)	$f$	0,55 [-]
Součinitel vlivu rotačních částí	$\vartheta$	1,3 [-]
Rychlost otáčení	$\omega$	10°/s

**Výpočet tíhové síly** – Tíhová síla je dána součinem maximální hmotnosti působící na jedno kolo roveru a tíhového zrychlení.

$$G = m \cdot g = 20 \cdot 9,81 = 196,2 \text{ N} \quad (3.29)$$

**Výpočet třecí síly** – Třecí síla je pro zjednodušení umístěna pouze do dvou bodů na koncích šířky kola.

$$F_t = \frac{G}{2} \cdot f = \frac{196,2}{2} \cdot 0,55 = 54 \text{ N} \quad (3.30)$$

**Výpočet třecího momentu** – Moment, který potřebujeme pohonnou jednotkou dodat pro překonání tření. Dynamické účinky hmot při rotaci jsou nahrazeny součinitelem vlivu rotačních částí.

$$M_T = 2 \cdot F_t \cdot B \cdot \vartheta = 2 \cdot 54 \cdot 0,075 \cdot 1,3 = 10,53 \text{ Nm} \quad (3.31)$$

**Potřebné otáčky** – Potřebné otáčky pro dosažení minimální rychlosti.

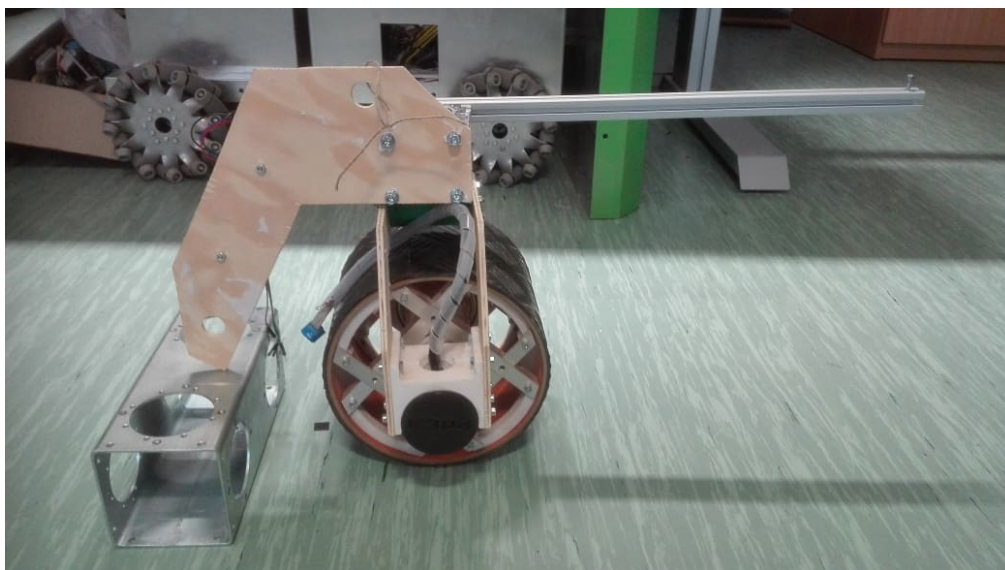
$$n_R = \frac{\omega}{360} \cdot 60 = \frac{5}{360} \cdot 60 = 1,67 \text{ ot/min} \quad (3.32)$$

**Hnací výkon svislé rotace** – Potřebný výkon svislé rotace při minimálních otáčkách.

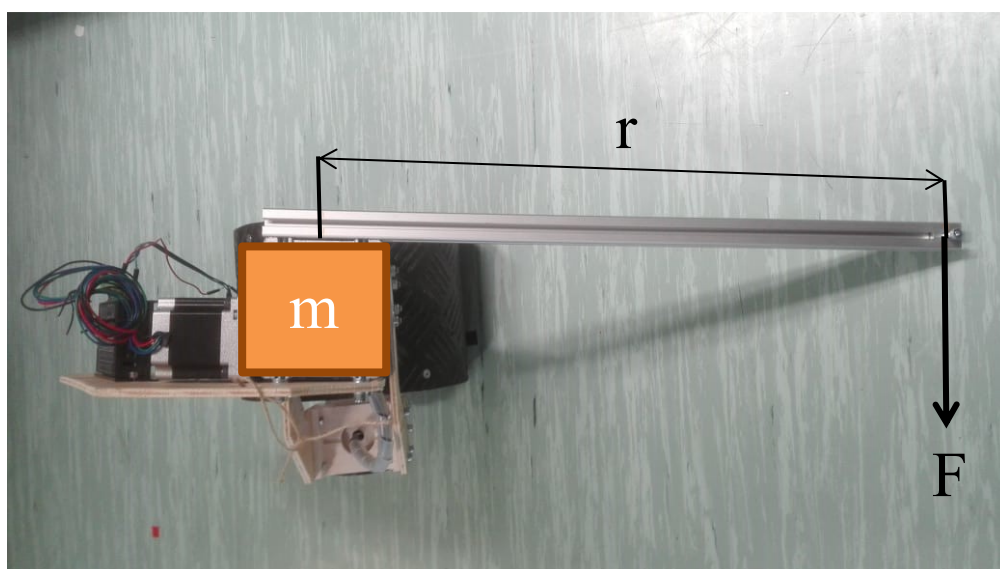
$$P_{Kz} = M_T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_R}{60} = 10,53 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1,67}{60} = 1,84 \text{ W} \quad (3.33)$$

### 3.2.2 Měření momentu svislé rotace kola

Pro měření potřebného kroutícího momentu pohonu svislé rotace byl za pomoci Ing. Roberta Pastora vytvořen z dílů roveru RoverOva K3P4 jednoduchý prototyp.



Obr. 17 – Prototyp kola pro měření potřebného momentu pohonu svislé rotace



Obr. 18 – Schéma základních parametrů pro měření na prototypu kola

Měření na prototypu probíhalo následovně. Kolo se položilo na vybraný povrch a na šnekovou převodovku bylo připevněno závaží o hmotnosti  $m = 15 \text{ Kg}$  tak, aby celková hmotnost prototypu dosahovala zvolené maximální hodnoty  $20 \text{ Kg}$ . Dále se na konec ramene o změřené délce  $r = 450 \text{ mm}$  připevnil siloměr pro měření síly  $F$  potřebné pro překonání třecích sil mezi kolem a povrchem. Pro získání dané hodnoty  $F$  se na siloměr vyvolila tažná síla, kterou jsme zvyšovali, dokud nedošlo k pohybu kola. Jakmile došlo k pohybu byla ze siloměru zapsána naměřená hodnota síly a ta se dále přepočítala na krouticí moment dle vzorce:

$$M_T = F \cdot r \quad (3.34)$$

Měření bylo provedeno pro 3 různé typy povrchu. Pryž na asfaltu, pryž na šterku a pryž na trávníku. Rychlost otáčení kola při měření byla přibližně  $2 \text{ ot/min}$ .

### 3.2.3 Výsledné hodnoty pro návrh pohonu svislé rotace

Dle provedených výpočtů a měření, byly pro volbu motoru a převodovky pro pohon svislé rotace vypočteny a naměřeny tyto hodnoty.

Tab. 7 – Výsledné hodnoty výpočtu pro návrh pohonu kola

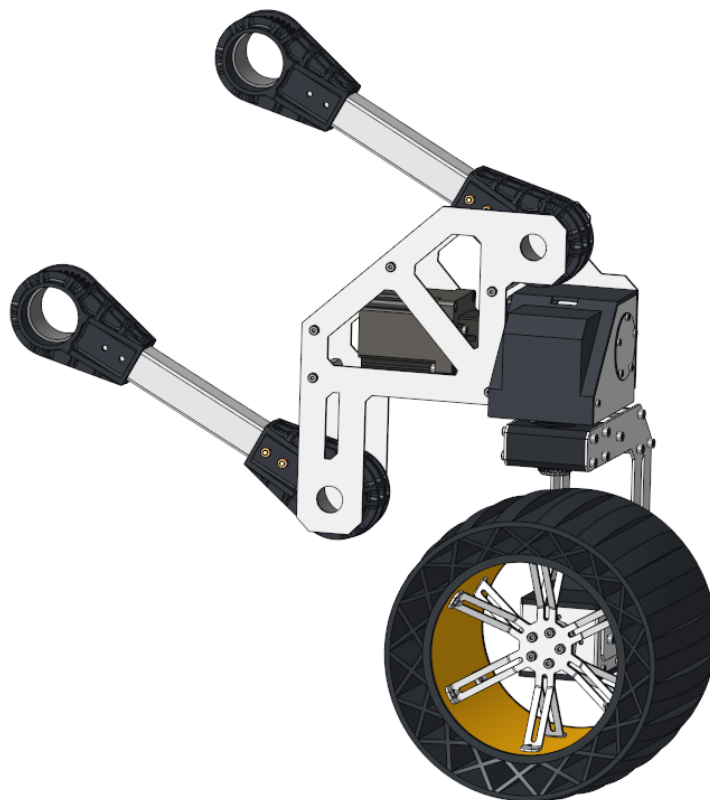
Typ povrchu	Výkon	Krouticí moment	Otáčky
Výpočet pro asfalt	1,84 W	10,53 Nm	1,67 ot/min
Měření na asfaltu	1,67 W	8 Nm	2 ot/min
Měření na šterku	1,46 W	7 Nm	2 ot/min
Měření na trávníku	2,1 W	10 Nm	2 ot/min

## 4 Varianty řešení

Byly vytvořeny tři varianty řešení. Varianty se liší způsobem přenosu momentu z pohonu na kolo, uložením motoru, typem převodu svislé rotace, typem konstrukce sloupku a způsobem pasivního odpružení.

### 4.1 Varianta A

Varianta A je kombinací svislé rotace se šnekovou převodovkou vlastní konstrukce s kupovaným šnekovým soukolím a krokovým motorem, a pohonem kola s planetovou převodovkou, kde je kolo připevněno přímo na výstupní hřídel. Pasivní odpružení zajišťuje tvar pryžové pneumatiky inspirován pneumatikou Michelin Tweel [9].

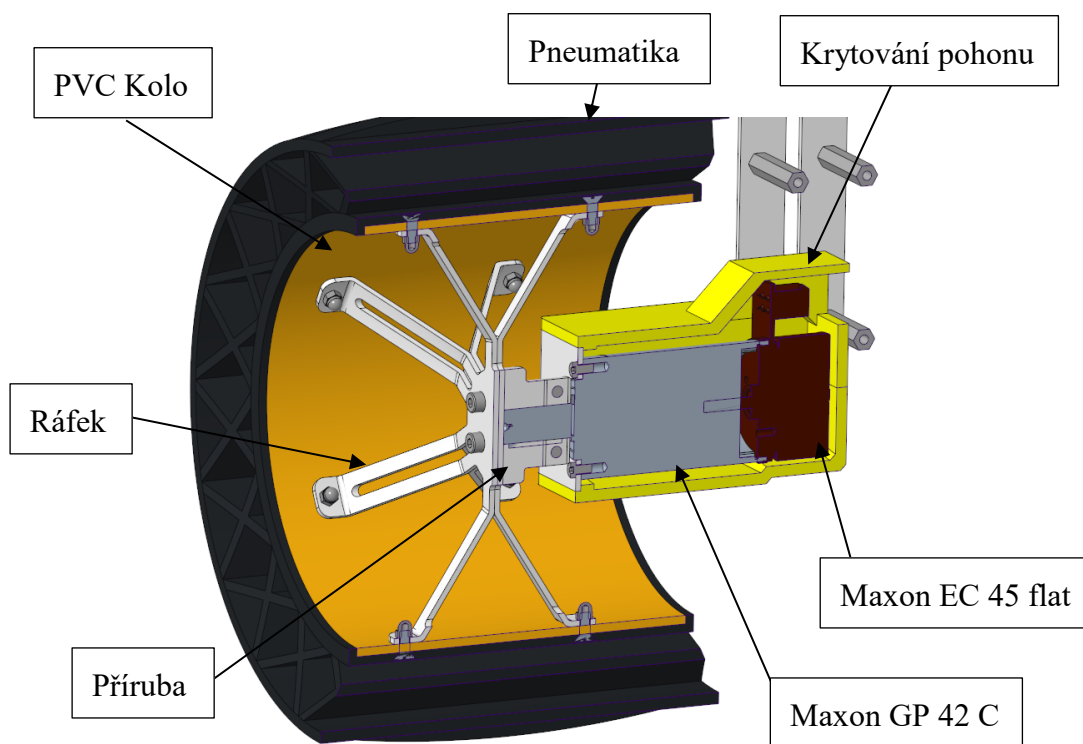


Obr. 19 – Varianta A



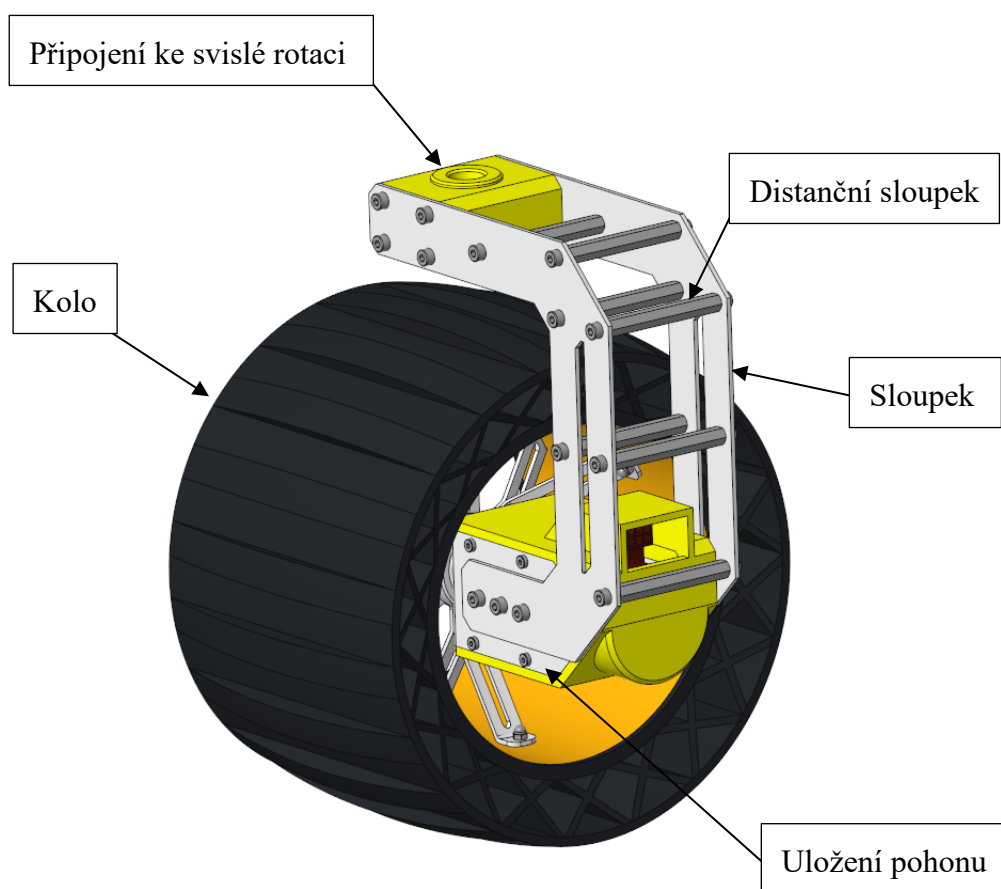
#### 4.1.1 Varianta A – kolo

Jako pohonná jednotka kola varianty A byla zvolena kombinace motoru **Maxon EC 45 flat Ø42,8 mm, brushless, 70 Watt, with Hall sensor** [10] a planetové převodovky **Maxon Planetary Gearhead GP 42 C Ø42 mm, 3-15 Nm, Ceramic version** [10]. Pohon je uložen na 2 mm ocelový plech ohnutý do tvaru U a proti vlivům okolního prostředí je chráněn dvoudílným tištěným plastovým ochranným krytváním. Na výstupní hřídel převodovky je pomocí svěrného spoje připevněna příruba, na kterou je šroubováno kolo. Kolo je tvořeno dvoudílným na laseru řezaným a následně ohýbaným ráfem z 2 mm ocelového plechu. Na ráfek je na trvalo přišroubováno plastové kolo, ke kterému je přilepena speciální tištěná pryžová pneumatika, která svým tvarem zajišťuje pasivní odpružení kola.



Obr. 20 – Uložení pohonu kola varianty A

Sloupek, pomocí kterého je kolo připojeno ke svislé rotaci, tvoří dva na laseru řezané hliníkové plechy o tloušťce 2 mm k sobě šroubované přes 7 distančních sloupků. Sloupek je z jedné strany přišroubován k uložení motoru a z druhé strany je přišroubován plastový díl pro připojení k výstupní hřídeli převodovky svislé rotace. Kolo bude na výstupní hřídeli zajištěno axiálně pomocí KM matice s MB podložkou. Moment z pohonu svislé rotace bude na kolo přenášen pomocí těsného pera.



Obr. 21 – Kolo varianta A

Tab. 8 – Parametry kola varianty A

Parametr	Hodnota
<b>Obecné parametry kola</b>	
Hmotnost	3,23 Kg
Počet dílů (bez spojovacího materiálu)	21 dílů
Maximální rozměry (bez sloupku) v – š - h	210 – 210 - 196,5 mm
<b>Parametry motoru Maxon EC 45 flat</b>	
Napájení	24 V
Maximální otáčky	10 000 ot/min
Nominální otáčky	4860 ot/min
Nominální moment	128 mNm
Nominální napětí	3,21 A
Výkon	70 W
Hmotnost	140 g
<b>Parametry převodovky Maxon GP 42 C 126:1</b>	
Převodový poměr	126:1
Průměr výstupního hřídele	8 mm
Nominální moment	3 – 15 Nm
Účinnost	72 %
Maximální nominální přenos výkonu	110 W
Maximální radiální zatížení	360 N
Maximální axiální zatížení (dynamické)	150 N
Hmotnost	460 g

## 4.1.1.1 Kontrola motoru kola varianty A

Kontrola výkonových parametrů zvoleného motoru a převodovky, dle vypočtených hodnot pro návrh pohonu při jízdě po rovině a nakloněné rovině.

Tab. 9 – Kontrola motoru kola varianty A

Parametry pro výpočet	Značení	Hodnota
Převodový poměr	$i$	126:1
Účinnost převodovky	$\mu_p$	72%
Výkon na kole pro rovinu	$P_k$	20,81 W
Moment na kole pro rovinu	$M_k$	4,16 Nm
Otáčky na kole pro rovinu	$n_k$	47,75 ot/min
Výkon na kole pro nakloněnou rovinu	$P_{k2}$	33,05 W
Moment na kole pro nakloněnou rovinu	$M_{k2}$	13,22 Nm
Otáčky na kole pro nakloněnou rovinu	$n_{k2}$	23,87 ot/min

**Přepočet momentu na motor** – Moment potřebný na motoru se přepočte přes převodový poměr a účinnost zvolené převodovky.

$$M_m = \frac{M_k}{i \cdot \mu_p} = \frac{4,16}{126 \cdot 0,72} = 0,046 \text{ Nm} = 46 \text{ mNm} \quad (4.1)$$

$$M_{m2} = \frac{M_{k2}}{i \cdot \mu_p} = \frac{13,22}{126 \cdot 0,72} = 0,146 \text{ Nm} = 146 \text{ mNm}$$

**Přepočet výkonu na motor** – Výkon potřebný na motoru se přepočte podílem výkonu na kole a účinností zvolené převodovky.

$$P_m = \frac{P_k}{\mu_p} = \frac{20,81}{0,72} = 28,9 \text{ W} \quad (4.2)$$

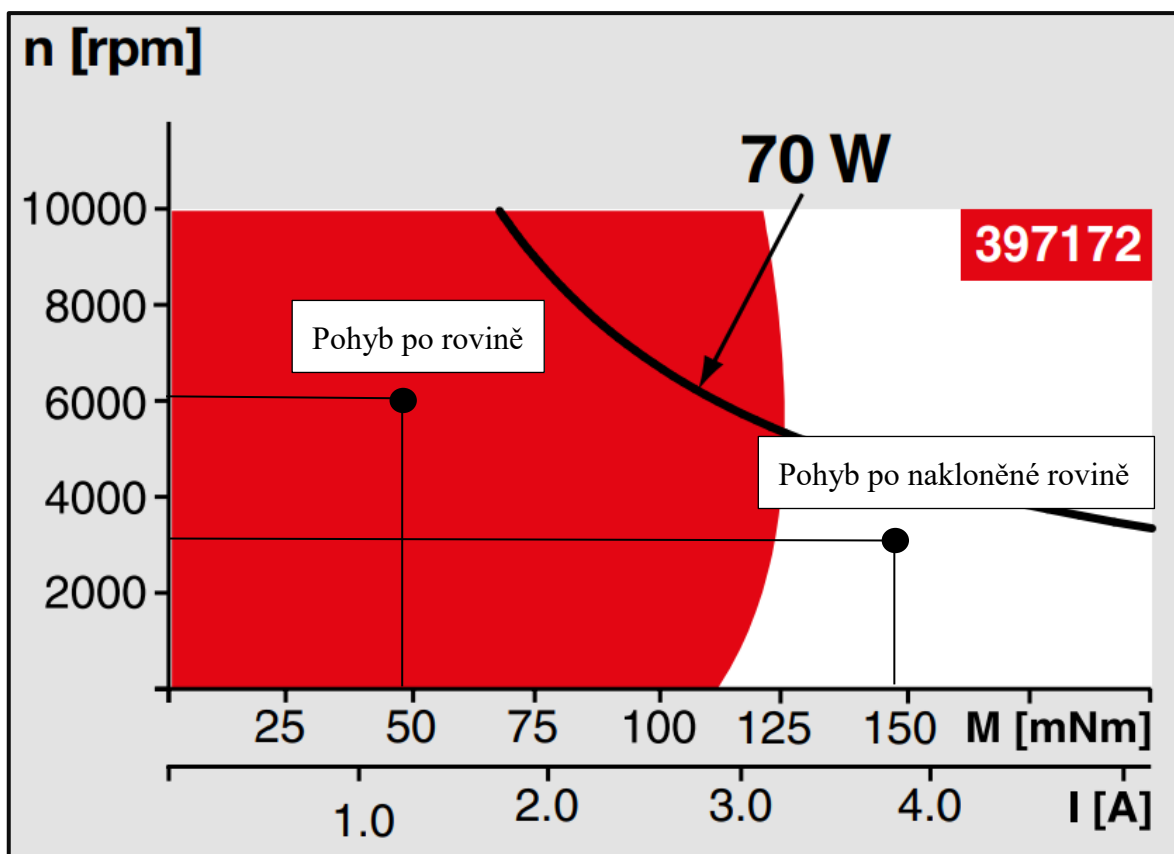
$$P_{m2} = \frac{P_{k2}}{\mu_p} = \frac{33,05}{0,72} = 45,9 \text{ W}$$

**Přepočet otáček na motor** – Otáčky potřebné na motoru se přepočtou přes převodový poměr zvolené převodovky.

$$n_m = n_k \cdot i = 47,75 \cdot 126 = 6\,016,5 \text{ ot/min} \quad (4.3)$$

$$n_{m2} = n_{k2} \cdot i = 23,87 \cdot 126 = 3\,003,8 \text{ ot/min}$$

**Kontrola výkonnostních parametrů motoru** – Přepočtené hodnoty z kola na motor se porovnají s momentovou charakteristikou zvoleného motoru. Červené pole hodnot značí doporučené operační rozpětí motoru, bílé pole pak krátkodobé operační rozpětí, ve kterém může motor pracovat nepřetržitě po omezenou dobu (vhodné např. pro přejetí překážky, nebo zdolání strmého kopce).

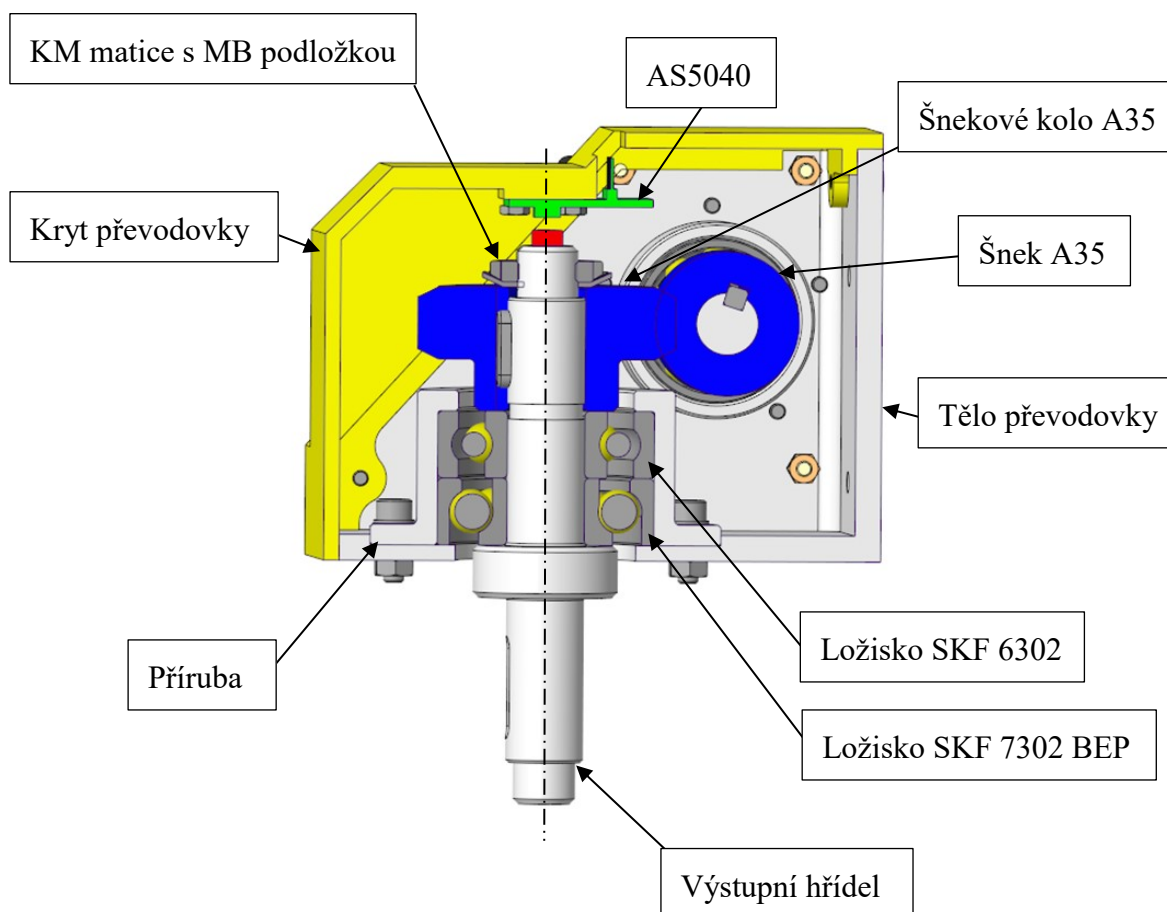


Obr. 22 -Momentová charakteristika motoru MAXON EC 45 flat [10]

Po dosazení přepočtených hodnot do grafu momentové charakteristiky motoru můžeme vidět, že zvolený motor **vyhovuje** parametrům návrhového výpočtu.

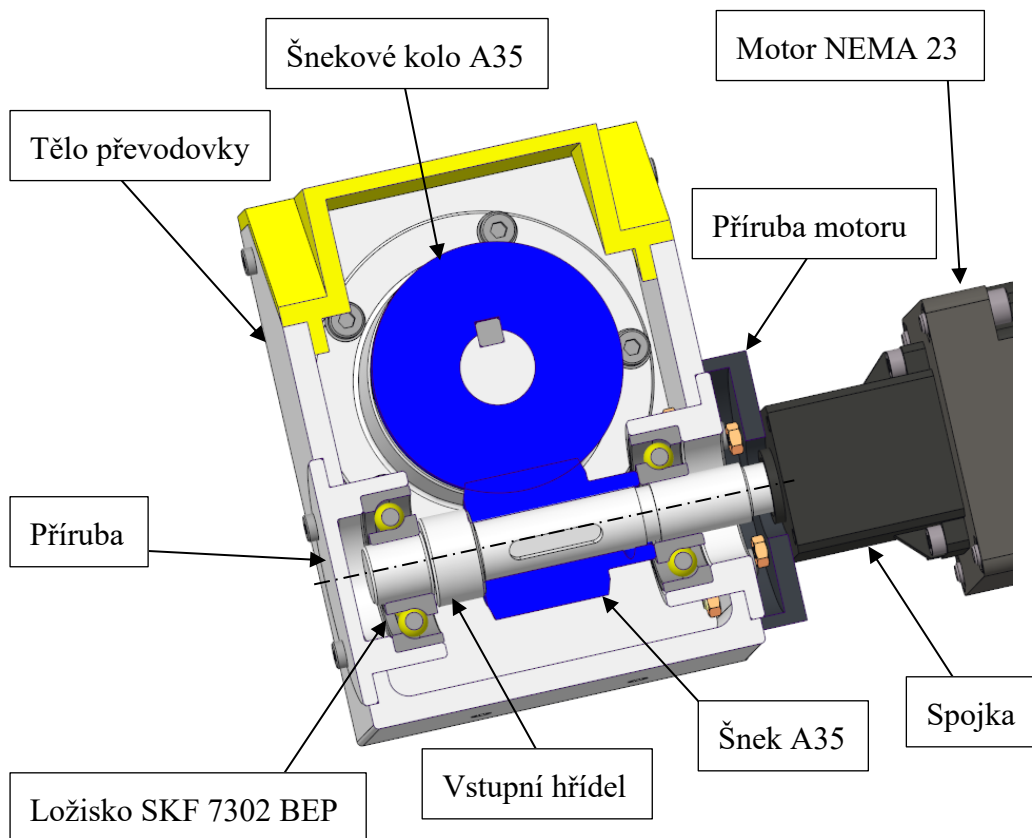
#### 4.1.2 Varianta A – svislá rotace

Jako pohonná jednotka svislé rotace varianty A byla zvolena kombinace krokového motoru **LAM Technologies NEMA 23 1,4 Nm** [11] a vlastní šnekové převodovky se šnekovým soukolím **MADLER A 35, převod 30:1** [12]. Tělo převodovky je frézováno z jednoho kusu hliníku, do kterého jsou pomocí přírub přišroubována uložení osy šnekového kola a osy šneku (viz. Obr. 23 – Osa šnekového kola převodovky varianty A a Obr. 24 – Osa šneku převodovky varianty A ). Proti vlivům okolního prostředí je převodovka chráněna tištěným plastovým krytem. Jelikož musí svislá rotace umožňovat polohové řízení, je převodovka také opatřena magnetickým rotačním enkodérem AS5040 [13] umístěným v ose výstupního hřídele, který snímá aktuální polohu natočení.



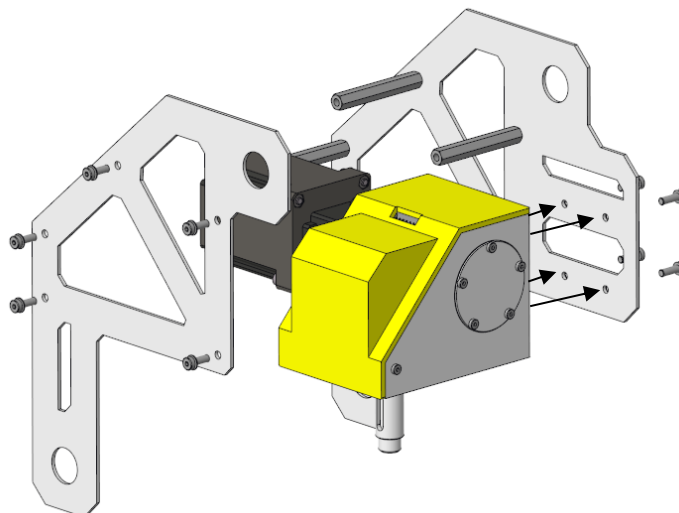
Obr. 23 – Osa šnekového kola převodovky varianty A

Motor svislé rotace je k převodovce připevněn přes kupovanou spojku, která přenáší kroutící moment z motoru na vstupní hřídel převodovky a přírubu motoru, která je přišroubována k tělu převodovky.



Obr. 24 – Osa šneku převodovky varianty A

Spodní část paralelogramu je tvořena ze dvou přes distance k sobě připojených plechů. Převodovka je k ní připojena zezadu k jednomu z plechů pomocí 4 šroubů. Motor je pak sevřen tvarově mezi danými plechy (viz. Obr. 25 - Připojení svislé rotace k paralelogramu).



Obr. 25 - Připojení svislé rotace k paralelogramu

Tab. 10 – Parametry svislé rotace varianta A

Parametr	Hodnota
<b>Obecné parametry svislé rotace (bez připojení k paralelogramu)</b>	
Hmotnost	2,1 Kg
Maximální rozměry v – š - h	130 – 198 - 108 mm
<b>Parametry krokového motoru LAM NEMA 23 1,4 Nm</b>	
Napájení	24 V
Zádržný moment	1,4 Nm
Úhel kroku	1,8°
Fázový proud	3 A
Délka	64 mm
Typ vinutí	Bipolární
Počet vodičů	4
Hmotnost	850 g
<b>Parametry převodovky se šnekovým soukolím MADLER A35</b>	
Převodový poměr	30:1
Průměr výstupního hřídele	15 mm
Maximální moment (dynamický)	15 Nm
Účinnost (soukolí)	35 %
Hmotnost	1,25 Kg



## 4.1.2.1 Kontrola motoru svislé rotace varianty A

Kontrola momentu zvoleného motoru, dle vypočtených a naměřených hodnot pro návrh pohonu svislé rotace.

Tab. 11 – Kontrola motoru svislé rotace varianty A

Parametry pro výpočet	Značení	Hodnota
Převodový poměr	$i$	30:1
Účinnost převodovky	$\mu_p$	35%
Výpočet pro asfalt	$M_{kv}$	10,53 Nm
Měření na asfaltu	$M_{km1}$	8 Nm
Měření na šterku	$M_{km2}$	7 Nm
Měření na trávníku	$M_{km3}$	10 Nm

**Přepočet momentu na motor** – Moment potřebný na motoru se přepočte přes převodový poměr a účinnost převodovky. Počítáme s největším zjištěným momentem  $M_{kv}$ ,

$$M_m = \frac{M_{kv}}{i \cdot \mu_p} = \frac{10,53}{30 \cdot 0,35} = 1 \text{ Nm} \quad (4.4)$$

Zvolený motor o maximálním momentu **1,4 Nm** **vyhovuje** parametrům návrhového výpočtu.

## 4.2 Varianta B

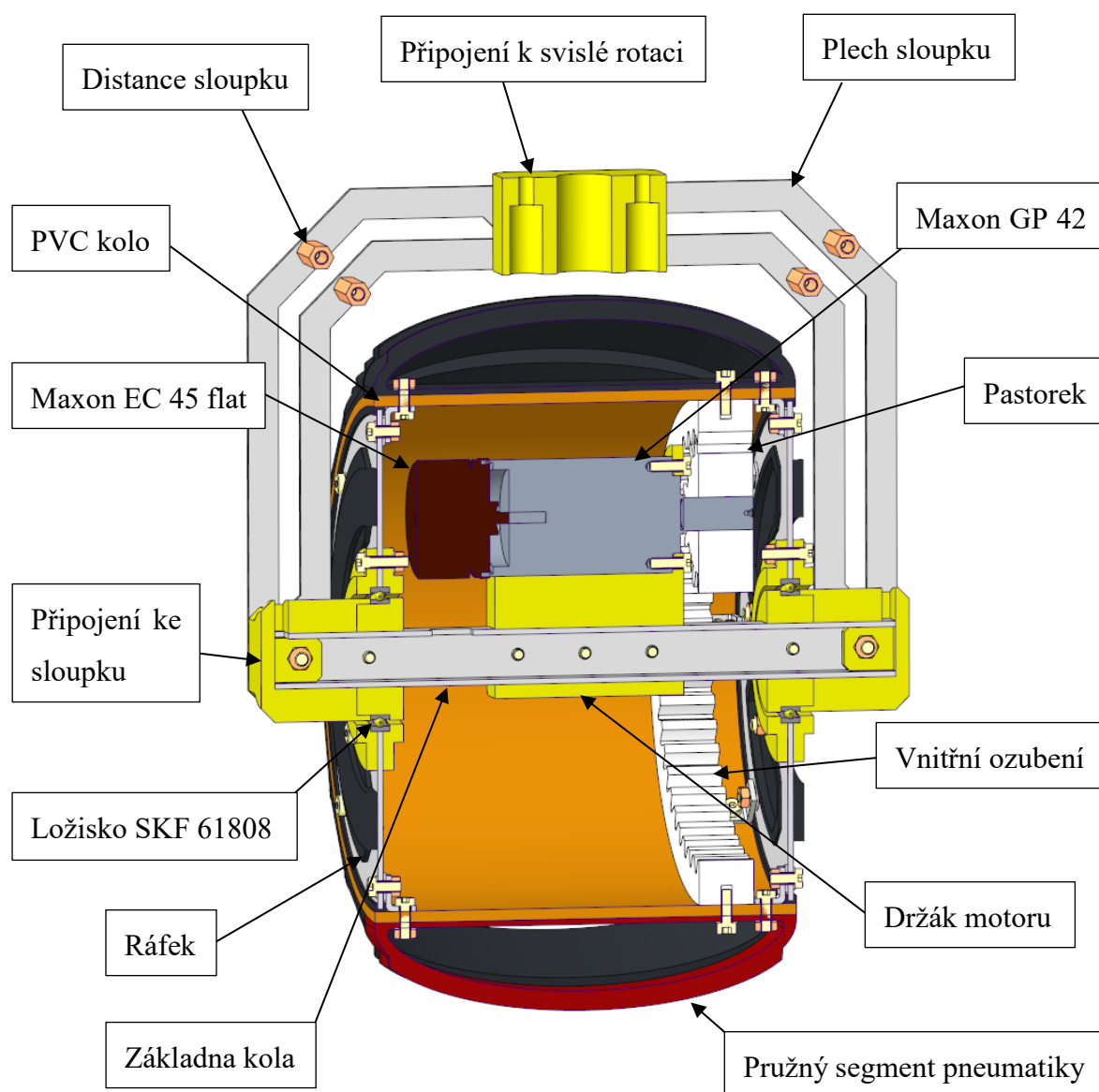
Varianta B je kombinací svislé rotace se šnekovou převodovkou značky IGUS [14] a DC motorem značky Pololu [15], a pohonem kola s planetovou převodovkou, kde je motor umístěn mimo osu rotace kola a kolo je připevněno ke sloupku ze dvou stran. Pasivní odpružení zajišťují pružné segmenty tvořící pneumatiku.



Obr. 26 – Varianta B

### 4.2.1 Varianta B – kolo

Jako pohonná jednotka kola varianty B byla taktéž zvolena kombinace motoru **Maxon EC 45 flat Ø42,8 mm, brushless, 70 Watt, with Hall sensor** [10] a planetové převodovky **Maxon Planetary Gearhead GP 42 C Ø42 mm, 3-15 Nm, Ceramic version** [10]. Pohon je uložen v tištěném dílu uvnitř kola mimo osu jeho rotace. Moment je na kolo přiveden na přímo pomocí tištěného plastového vnitřního ozubení s převodem 3:1. Celé kolo se přes ložiska otáčí na základně tvořené hliníkovým profilem 20x20 mm, ke kterému je z obou stran připojen sloupek. Ten je tvořen podobně jako ve variantě A ze dvou k sobě šroubovaných na laseru řezaných hliníkových plechů tloušťky 2 mm. Kolo je ke svislé rotaci přišroubováno přes tištěný plastový díl s náležitými připojovacími rozměry. Kolo je pasivně odpruženo pomocí pneumatiky, kterou tvoří 16 na sobě nezávislých pružných segmentů.



Obr. 27 – Kolo varianta B

Tab. 12 – Parametry kola varianty B

Parametr	Hodnota
<b>Obecné parametry kola</b>	
Hmotnost	3,78 Kg
Počet dílů (bez spojovacího materiálu)	44 dílů
Maximální rozměry (bez sloupku) v – š - h	250 – 250 - 237 mm
<b>Parametry motoru Maxon EC 45 flat</b>	
Napájení	24 V
Maximální otáčky	10 000 ot/min
Nominální otáčky	4860 ot/min
Nominální moment	128 mNm
Nominální napětí	3,21 A
Výkon	70 W
Hmotnost	140 g
<b>Parametry převodovky Maxon GP 42 C 53:1</b>	
Převodový poměr	53:1
Průměr výstupního hřídele	8 mm
Nominální moment	3 – 15 Nm
Účinnost	72 %
Maximální nominální přenos výkonu	350 W
Maximální radiální zatížení	360 N
Maximální axiální zatížení (dynamické)	150 N
Hmotnost	460 g

## 4.2.1.1 Kontrola motoru kola varianty B

Kontrola výkonových parametrů zvoleného motoru a převodovky, dle vypočtených hodnot pro návrh pohonu při jízdě po rovině a nakloněné rovině.

Tab. 13 – Kontrola motoru kola varianty B

Parametry pro výpočet	Značení	Hodnota
Převodový poměr převodovky	$i_p$	53:1
Převodový poměr vnitřní ozubení	$i_{oz}$	3:1
Účinnost převodovky	$\mu_p$	72%
Účinnost vnitřního ozubení	$\mu_{oz}$	85%
Účinnost ložisek SKF 61808 (obou)	$\mu_l$	96%
Výkon na kole pro rovinu	$P_k$	20,81 W
Moment na kole pro rovinu	$M_k$	4,16 Nm
Otáčky na kole pro rovinu	$n_k$	47,75 ot/min
Výkon na kole pro nakloněnou rovinu	$P_{k2}$	33,05 W
Moment na kole pro nakloněnou rovinu	$M_{k2}$	13,22 Nm
Otáčky na kole pro nakloněnou rovinu	$n_{k2}$	23,87 ot/min

**Přepočet momentu na motor** – Moment potřebný na motoru se přepočte přes převodové poměry a účinnosti zvolené převodovky, ozubení a ložisek.

$$M_m = \frac{M_{k1}}{i_p \cdot \mu_p \cdot i_{oz} \cdot \mu_{oz} \cdot \mu_l} = \frac{4,16}{53 \cdot 0,72 \cdot 3 \cdot 0,85 \cdot 0,96} = 0,045 \text{ Nm} \quad (4.5)$$

$$M_{m2} = \frac{M_{k2}}{i_p \cdot \mu_p \cdot i_{oz} \cdot \mu_{oz} \cdot \mu_l} = \frac{13,22}{53 \cdot 0,72 \cdot 3 \cdot 0,85 \cdot 0,96} = 0,142 \text{ Nm}$$

**Přepočet výkonu na motor** – Výkon potřebný na motoru se přepočte podílem výkonu na kole a účinností zvolené převodovky, vnitřního ozubení a ložisek.

$$P_m = \frac{P_k}{\mu_p \cdot \mu_{oz} \cdot \mu_l} = \frac{20,81}{0,72 \cdot 0,85 \cdot 0,96} = 35,4 \text{ W} \quad (4.6)$$

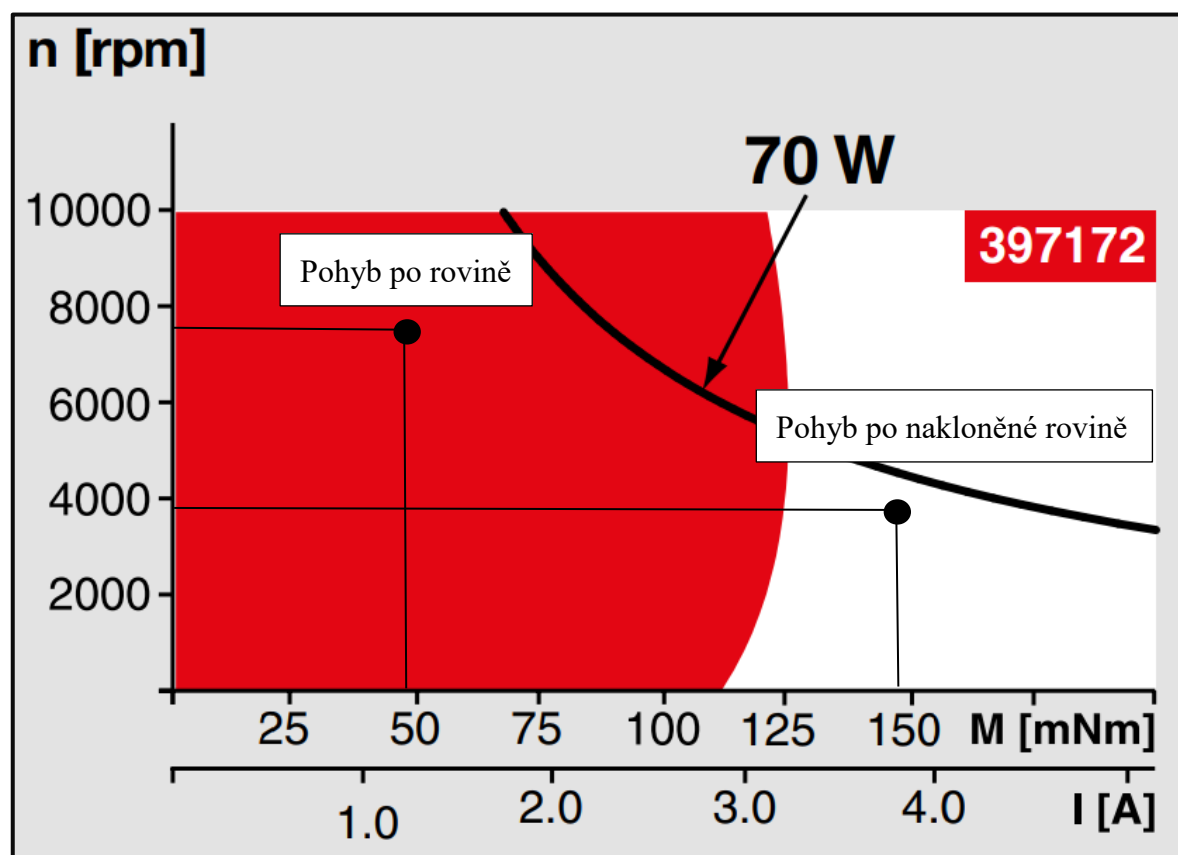
$$P_{m2} = \frac{P_{k2}}{\mu_p \cdot \mu_{oz} \cdot \mu_l} = \frac{33,05}{0,72 \cdot 0,85 \cdot 0,96} = 56,25 \text{ W}$$

**Přepočet otáček na motor** – Otáčky potřebné na motoru se přepočtou přes převodový poměr zvolené převodovky a vnitřního ozubení.

$$n_m = n_k \cdot i_p \cdot i_{oz} = 47,75 \cdot 53 \cdot 3 = 7\,592,3 \text{ ot/min} \quad (4.7)$$

$$n_{m2} = n_{k2} \cdot i_p \cdot i_{oz} = 23,87 \cdot 53 \cdot 3 = 3\,795,3 \text{ ot/min}$$

**Kontrola výkonnostních parametrů motoru** – Přepočtené hodnoty z kola na motor se porovnají s momentovou charakteristikou zvoleného motoru. Červené pole hodnot značí doporučené operační rozpětí motoru, bílé pole pak krátkodobé operační rozpětí, ve kterém může motor pracovat nepřetržitě po omezenou dobu (vhodné např. pro přejetí překážky, nebo zdolání strmého kopce).

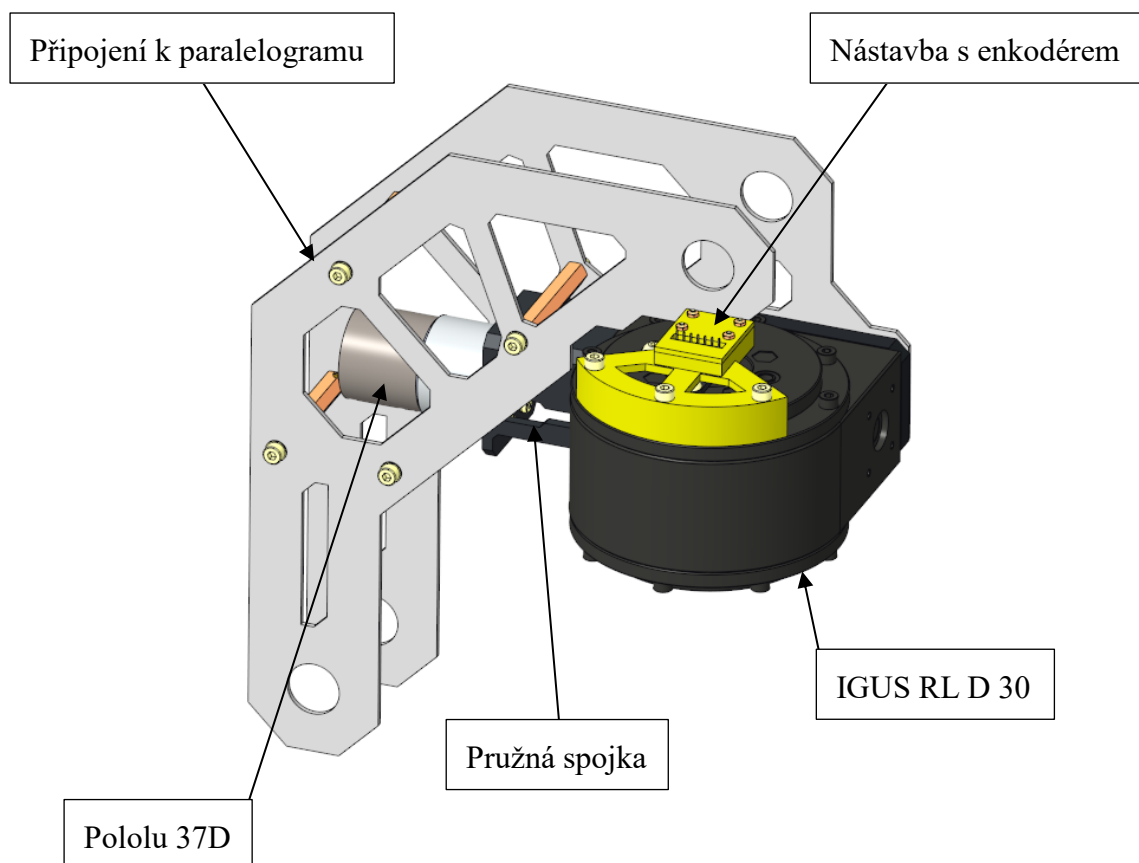


Obr. 28 - Momentová charakteristika motoru MAXON EC 45 flat [10]

Po dosazení přepočtených hodnot do grafu momentové charakteristiky motoru můžeme vidět, že zvolený motor **vyhovuje** parametrům návrhového výpočtu.

#### 4.2.2 Varianta B – svislá rotace

Jako pohonná jednotka svislé rotace varianty B byla zvolena kombinace DC pohonu **Pololu 37D 70:1 1,4 Nm** [15] a kupované šnekové převodovky **IGUS robolink D 30** [14]. K zjištění polohy natočení kola je převodovka opatřena tištěnou nástavbou s magnetickým rotačním enkodérem AS5040 [13]. Připojení rotace k paralelogramu odpružení je konstrukčně identické s předchozí variantou.



Obr. 29 – Svislá rotace varianta B

Tab. 14 – Parametry svislé rotace varianta B

Parametr	Hodnota
<b>Obecné parametry svislé rotace (bez připojení k paralelogramu)</b>	
Hmotnost	1,75 Kg
Maximální rozměry v – š - h	87 – 206,5 – 120 mm
<b>Parametry DC pohonu Pololu 37D 70:1 1,4 Nm</b>	
Napájení	6 / 12 V
Krouticí moment	1,4 Nm
Proud (12 V)	5 000 mA
Délka	57 mm
Hmotnost	200 g
Průměr výstupního hřídele	6 mm
<b>Parametry převodovky IGUS RL-D-30</b>	
Převodový poměr	30:1
Průměr výstupního hřídele	15 mm
Maximální moment (dynamický)	10 - 20 Nm
Účinnost (soukolí)	40 %
Hmotnost	790 g

#### 4.2.2.1 Kontrola motoru svislé rotace varianty B

Kontrola momentu zvoleného motoru, dle vypočtených a naměřených hodnot pro návrh pohonu svislé rotace.

Tab. 15 – Kontrola motoru svislé rotace varianty B

Parametry pro výpočet	Značení	Hodnota
Převodový poměr	$i$	30:1
Účinnost převodovky	$\mu_p$	40%
Výpočet pro asfalt	$M_{kv}$	10,53 Nm
Měření na asfaltu	$M_{km1}$	8 Nm
Měření na šterku	$M_{km2}$	7 Nm
Měření na trávníku	$M_{km3}$	10 Nm



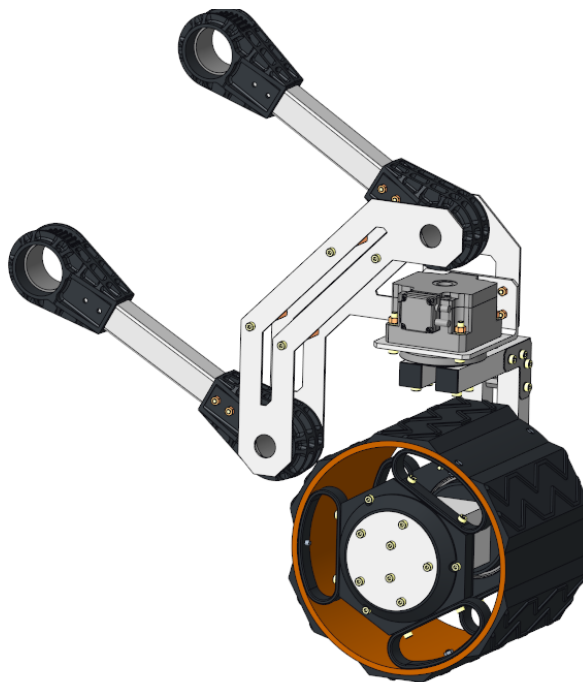
**Přepočet momentu na motor** – Moment potřebný na motoru se přepočte přes převodový poměr a účinnost převodovky. Počítáme s největším zjištěným momentem  $M_{kv}$ ,

$$M_m = \frac{M_{kv}}{i \cdot \mu_p} = \frac{10,53}{30 \cdot 0,40} = 0,88 \text{ Nm} \quad (4.8)$$

Zvolený motor o maximálním momentu **1,4 Nm** **vyhovuje** parametrům návrhového výpočtu.

### 4.3 Varianta C

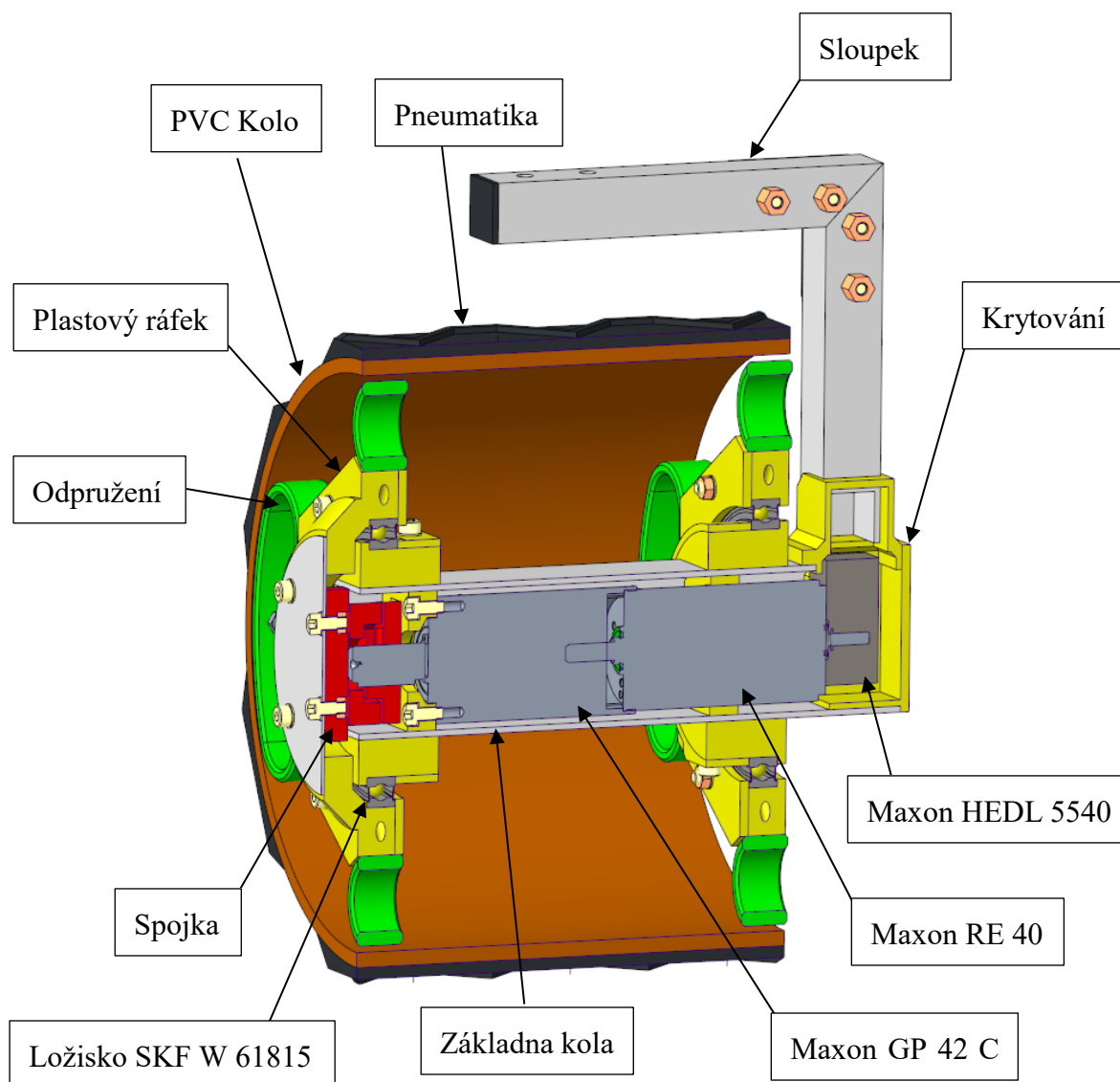
Varianta C je kombinací svislé rotace s pohonnou jednotkou s harmonickým převodem od firmy Harmonic Drive [16] a kola s pohonnou jednotkou s planetovou převodovkou od firmy Maxon Motor [10], kde je kolo k pohonu připojeno nepřímo pomocí spojky. Pasivní odpružení zajišťují pružné segmenty tvořící ráfek kola.



Obr. 30 – Varianta C

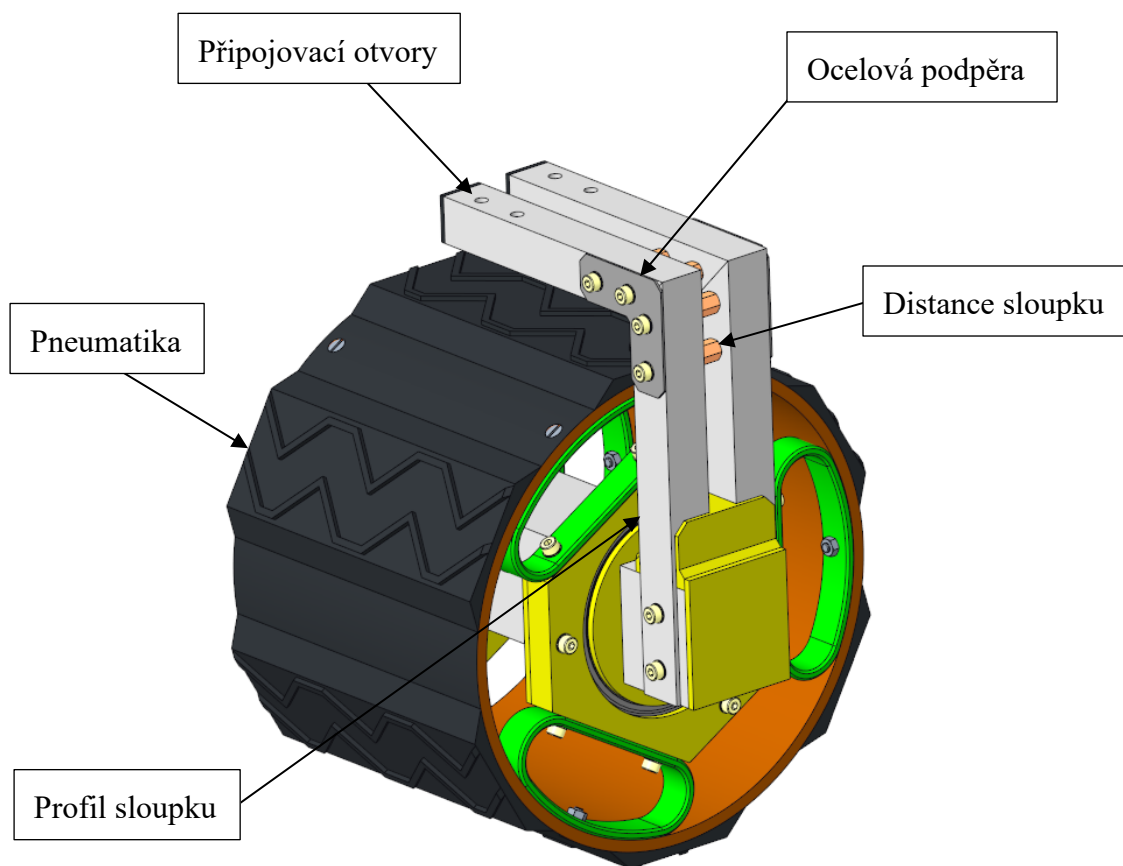
#### 4.3.1 Varianta C – kolo

Jako pohonná jednotka kola varianty C byla z aktuálního konstrukčního řešení roveru RoverOva K3P4 převzata kombinace motoru **Maxon RE 40 Ø40 mm, Graphite brushes, 150 Watt** [10] a planetové převodovky **Maxon Planetary Gearhead GP 42 C Ø42 mm, 3-15 Nm, Ceramic version** [10] a enkodérem **Maxon HEDL 5540** [10]. Pohon je uložen uvnitř hliníkového profilu 50x50 mm tvořícího základnu kola. Moment je na kolo přiveden nepřímo přes spojku. Ta slouží k vyrovnání osových nepřesností mezi výstupním hřídelem převodovky a ložisky na kterých se otáčí kolo. Ráfek kola je tvořen z několika tištěných dílů, kde některé z těchto dílů jsou pružné segmenty zajišťující pasivní odpružení kola. Kolo je obdobně jako u předchozích variant vyrobeno z PVC trubky, ke které je přilepena šestidílná dělená pneumatika.



Obr. 31 – Uložení pohonu kola varianta C

Sloupek kola tvoří 4 seříznuté hliníkové profily 20x20 mm. Profily jsou k sobě přišroubovány přes distanční matice a pohromadě drží pomocí ocelových výpalků, které slouží jako podpěry. Sloupek je šroubován přímo k profilu základny. Pro připojení k svislé rotaci slouží vyvrtané otvory s náležitými připojovacími rozměry.



Obr. 32 – Kolo varianta C

Tab. 16 – Parametry kola varianty C

Parametr	Hodnota
<b>Obecné parametry kola</b>	
Hmotnost	3,54 Kg
Počet dílů (bez spojovacího materiálu)	46 dílů
Maximální rozměry (bez sloupku) v – š - h	208 – 208 - 206 mm
<b>Parametry motoru Maxon RE 40</b>	
Napájení	24 V
Maximální otáčky	12 000 ot/min
Nominální otáčky	6940 ot/min
Nominální moment	177 mNm
Nominální napětí	6 A
Výkon	150 W
Hmotnost	480 g
<b>Parametry převodovky Maxon GP 42 C 113:1</b>	
Převodový poměr	113:1
Průměr výstupního hřídele	8 mm
Nominální moment	3 – 15 Nm
Účinnost	72 %
Maximální nominální přenos výkonu	110 W
Maximální radiální zatížení	360 N
Maximální axiální zatížení (dynamické)	150 N
Hmotnost	460 g

## 4.3.1.1 Kontrola motoru kola varianty C

Kontrola výkonových parametrů zvoleného motoru a převodovky, dle vypočtených hodnot pro návrh pohonu při jízdě po rovině a nakloněné rovině.

Tab. 17 – Kontrola motoru kola varianty C

Parametry pro výpočet	Značení	Hodnota
Převodový poměr	$i$	113:1
Účinnost převodovky	$\mu_p$	72%
Účinnost ložisek SKF W 61815 (obou)	$\mu_l$	96%
Výkon na kole pro rovinu	$P_k$	20,81 W
Moment na kole pro rovinu	$M_k$	4,16 Nm
Otáčky na kole pro rovinu	$n_k$	47,75 ot/min
Výkon na kole pro nakloněnou rovinu	$P_{k2}$	33,05 W
Moment na kole pro nakloněnou rovinu	$M_{k2}$	13,22 Nm
Otáčky na kole pro nakloněnou rovinu	$n_{k2}$	23,87 ot/min

**Přepočet momentu na motor** – Moment potřebný na motoru se přepočte přes převodový poměr a účinnost zvolené převodovky a ložisek.

$$M_m = \frac{M_k}{i \cdot \mu_p \cdot \mu_l} = \frac{4,16}{113 \cdot 0,72 \cdot 0,96} = 0,053 \text{ Nm} = 53 \text{ mNm} \quad (4.9)$$

$$M_{m2} = \frac{M_{k2}}{i \cdot \mu_p \cdot \mu_l} = \frac{13,22}{113 \cdot 0,72 \cdot 0,96} = 0,169 \text{ Nm} = 169 \text{ mNm}$$

**Přepočet výkonu na motor** – Výkon potřebný na motoru se přepočte podílem výkonu na kole a účinností zvolené převodovky a ložisek.

$$P_m = \frac{P_k}{\mu_p \cdot \mu_l} = \frac{20,81}{0,72 \cdot 0,96} = 30,1 \text{ W} \quad (4.10)$$

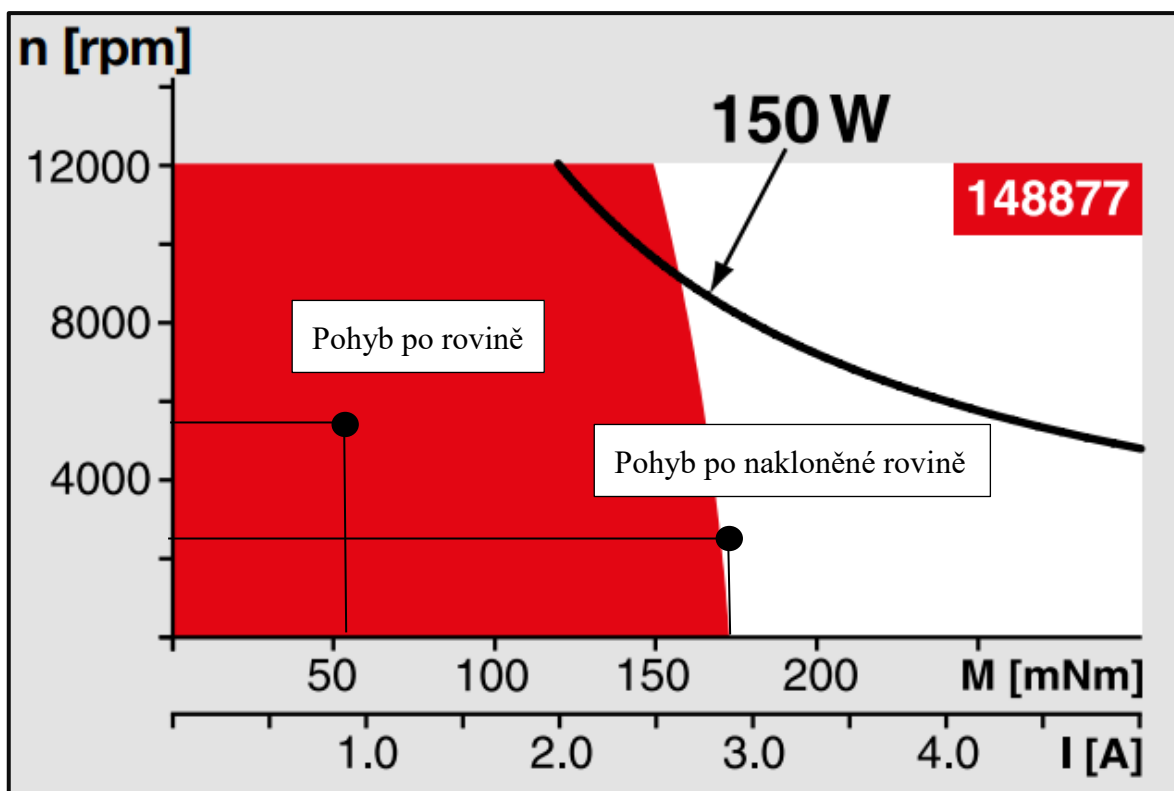
$$P_{m2} = \frac{P_{k2}}{\mu_p \cdot \mu_l} = \frac{33,05}{0,72 \cdot 0,96} = 47,8 \text{ W}$$

**Přepočet otáček na motor** – Otáčky potřebné na motoru se přepočtou přes převodový poměr zvolené převodovky.

$$n_m = n_k \cdot i = 47,75 \cdot 113 = 5\,395,8 \text{ ot/min} \quad (4.11)$$

$$n_{m2} = n_{k2} \cdot i = 23,87 \cdot 113 = 2\,697,3 \text{ ot/min}$$

**Kontrola výkonnostních parametrů motoru** – Přepočtené hodnoty z kola na motor se porovnají s momentovou charakteristikou zvoleného motoru. Červené pole hodnot značí doporučené operační rozpětí motoru, bílé pole pak krátkodobé operační rozpětí, ve kterém může motor pracovat nepřetržitě po omezenou dobu (vhodné např. pro přejetí překážky, nebo zdolání strmého kopce).

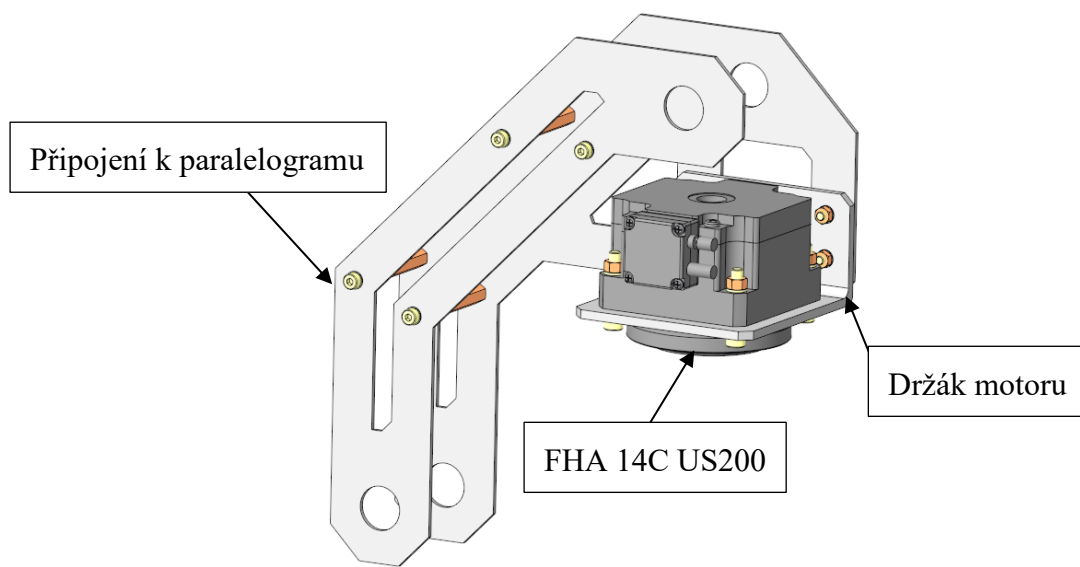


Obr. 33 – Momentová charakteristika motoru Maxon RE 40 [10]

Po dosazení přepočtených hodnot do grafu momentové charakteristiky motoru můžeme vidět, že zvolený motor **vyhovuje** parametrům návrhového výpočtu.

### 4.3.2 Varianta C – svislá rotace

Jako pohonná jednotka svislé rotace varianty C byla zvolena jednotka s harmonickým převodem **Harmonic Drive FHA 14C US200** [16] s absolutním enkodérem. Pohonná jednotka je ke spodní části paralelogramu odpružení připojena přes hliníkový držák. Spodní část paralelogramu je konstrukčně identická s předchozími variantami.



Obr. 34 – Svislá rotace varianta C

Tab. 18 – Parametry svislé rotace varianta C

Parametr	Hodnota
<b>Obecné parametry svislé rotace (bez připojení k paralelogramu)</b>	
Hmotnost	1,41 Kg
Maximální rozměry v – š - h	66 – 90 - 94 mm
<b>Parametry pohonu FHA 14C US200</b>	
Napájení	24 V
Maximální moment na výstupu	18 Nm
Maximální otáčky na výstupu	120 ot/min
Převodový poměr	50:1
Proud	6,2 A
Hmotnost	1,3 Kg

## 5 Hodnocení variant a výběr optimální varianty

Z rozpracovaných variant bude vybráno zvlášť jedno kolo a zvlášť jedna rotace, které budou dále rozpracovány. Pro výběr optimální varianty kola a rotace bude použita vícekritériální analýza. K posouzení je třeba vybrat určitá průkazná kritéria, ze kterých se díky metodě porovnávání v páru trojúhelníku a počtu voleb určí váha významnosti jednotlivých kritérií. Dále se zjistí vážený index, a to vynásobením jednotlivých bodů váhou významnosti. Vážené indexy se poté sečtou a porovnají.

### 5.1 Hodnocená kritéria

Tab. 19 – Hodnocená kritéria

Kritéria	Název	Popis
K1	Cena	Cena pohonných jednotek variant
K2	Hmotnost	Celková hmotnost
K3	Spotřeba pohonů	Maximální spotřeba proudu pohonů
K4	Rozměry	Délka motoru kola / max. rozměry rotace
K5	Složitost konstrukce	Počet dílů konstrukce (bez spoj. materiálu)

### 5.2 Stupnice hodnocení

Varianty budou porovnávány a bodovány od 1 do 3, kde bod 3 je nejlepší stav a bod 1 nejhorší v daném kritériu.

Tab. 20 – Stupnice hodnocení

Stupnice hodnocení	
3	Vysoká úroveň
2	Průměrná úroveň
1	Nizká úroveň

Významnost kritérií se bude pohybovat od 1 do 2, kde 2 je nejvyšší významnost a 1 nejnižší.

Tab. 21 – Významnost kritérií

Významnost kritérií	
2	Nejvyšší
1	Nejnižší



### 5.3 Metoda trojúhelníkových párů

Určení významnosti jednotlivých kritérií metodou trojúhelníkových párů je provedeno následovně. Prvně porovnáme mezi sebou všechna kritéria, kde se vždy určí, které kritérium je důležitější, a to je poté ohodnoceno jedním bodem. V případě že jsou kritéria stejně důležitá, přičte se každému půl bodu. Poté se podle počtu bodů určí pořadí a spočte váha jejich významnosti. Váha významnosti se vypočte podle lineární závislosti pomocí uvedeného vztahu.

$$v = 0,2 \cdot p + 0,8 \quad (5.1)$$

Kde:  $v$ ... váha významnosti

$p$ ... počet voleb

Tab. 22 – Metoda trojúhelníkových párů

				Počet voleb	Pořadí	Váha významnosti
K1	K1	K1	K1	3,5	1	1,5
K2	K3	K4	K5			
	K2	K2	K2	3	2	1,4
	K3	K4	K5			
		K3	K3	2	3	1,2
		K4	K5			
			K4	0,5	5	0,9
			K5			
				1,5	4	1,1

### 5.4 Hodnocení variant

Varianty byly hodnoceny podle stupnice hodnocení body 1 až 3, kde 3 znamená nejlepší výsledek a 1 nejhorší. Jsou společně hodnoceny všechny varianty rotace a všechny varianty kola. Výsledkem hodnocení bude jedna varianta kola a jedna varianta rotace, které spolu budou tvořit optimální variantu.

### 5.4.1 Hodnocení variant kola

Tab. 23 – Hodnocení variant kola

Hodnocení variant kola							
Kritérium	Hodnota			Významnost	Vážený index		
	A	B	C		A	B	C
K1	3	2	1	1,5	4,5	3	1,5
K2	3	1	2	1,4	4,2	1,4	2,8
K3	2	3	1	1,2	2,4	3,6	1,2
K4	3	1	2	0,9	2,7	0,9	1,8
K5	3	1	2	1,1	3,3	1,1	2,2
Celkový součet vážených indexů					17,1	10	9,5

**K1** – Nejlevnější se ukázala konstrukce kola varianty A, nejhůře dopadla varianta C

**K2** – Nejnižší hmotnost podle 3D modelu v programu Creo Parametric má varianta kola A

**K3** – Nejmenší spotřeba podle zvolených komponent byla vypočtena u kola varianty B

**K4** – Nejmenší délka uložení motoru byla naměřena u varianty A

**K5** – Z 3D modelu variant bylo zjištěno že nejmenší počet dílů, a tudíž nejméně složitou konstrukci má varianta A

Jako nejlepší vyšla po sečtení jednotlivých vážených indexů varianta kola A se součtem 17,1 bodů.

### 5.4.2 Hodnocení variant svislé rotace

Tab. 24 – Hodnocení variant svislé rotace

Hodnocení variant svislé rotace							
Kritérium	Hodnota			Významnost	Vážený index		
	A	B	C		A	B	C
K1	2	3	1	1,5	3	4,5	1,5
K2	1	2	3	1,4	1,4	2,8	4,2
K3	2	3	1	1,2	2,4	3,6	1,2
K4	1	2	3	0,9	0,9	1,8	2,7
K5	1	2	3	1,1	1,1	2,2	3,3
Celkový součet vážených indexů					8,8	14,9	12,9

**K1** – Nejlevnější se ukázala konstrukce svislé rotace varianty B

**K2** – Nejnižší hmotnost podle 3D modelu v programu Creo Parametric má varianta svislé rotace C

**K3** – Nejmenší spotřeba podle zvolených komponent byla vypočtena u svislé rotace varianty B

**K4** – Nejmenší maximální rozměry byly naměřena u svislé rotace varianty C

**K5** – Z 3D modelu variant bylo zjištěno že nejmenší počet dílů, a tudíž nejméně složitou konstrukci má svislá rotace varianty C

Jako nejlepší vyšla po sečtení jednotlivých vážených indexů varianta svislé rotace B se součtem 14,9 bodů.

## 5.5 Vítězná varianta

Jako vítězná varianta vyšla kombinace kola varianty A a svislé rotace varianty B. Tato kombinace tedy bude dále rozpracována.

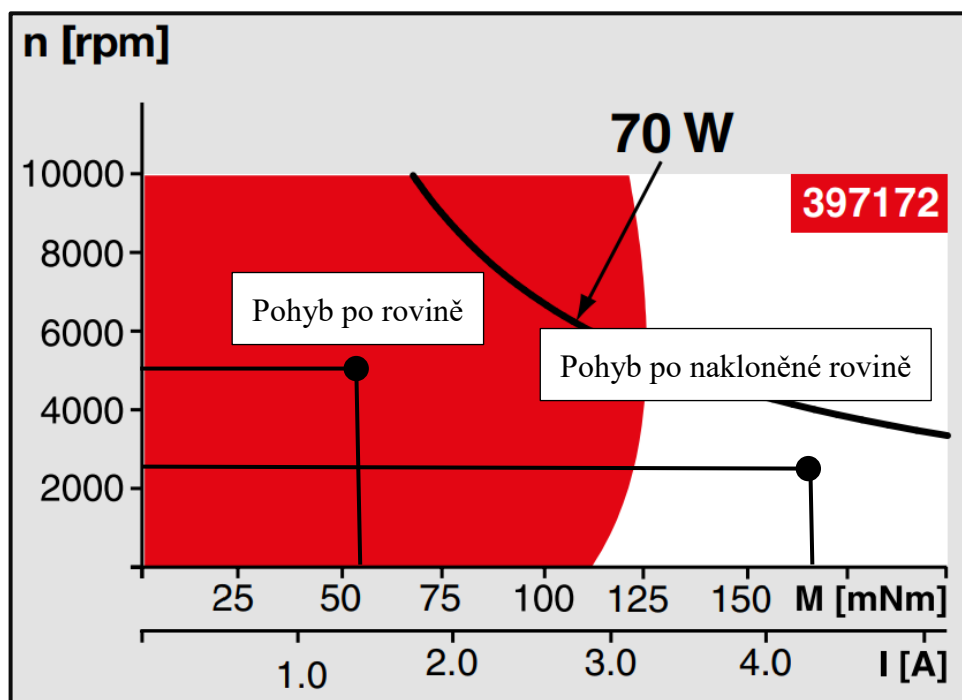
## 6 Konstrukční řešení zvolené varianty

Na základě hodnotové analýzy byla zvolena k detailnímu řešení kombinace kola varianty A a svislé rotace varianty B. Po spojení této kombinace bylo nutno upravit několik rozměrů, to se projevilo zvýšením průměru kola a větší osové vzdálenosti kol. Bylo tudíž nutno přepočíst výpočty pro dimenzování pohonu kola a znovu zkontrolovat, zda vyhovují. Výsledky kontroly jsou uvedeny v Tab. 25.

Tab. 25 – Hodnoty pro kontrolu motoru vybrané varianty

Typ pohybu	Výkon	Krouticí moment	Otáčky
Pohyb po rovině	20,8 W	5 Nm	39,79 ot/min
Pohyb po nakloněné rovině	31,78 W	15,35 Nm	19,9 ot/min
Překonání překážky	-	14,49 Nm	-
Max. hodnoty na motoru	44,14 W	0,169 Nm	2 507 ot/min
Hodnoty na motoru pro rovinu	28,9 W	0,055 Nm	5 013 ot/min

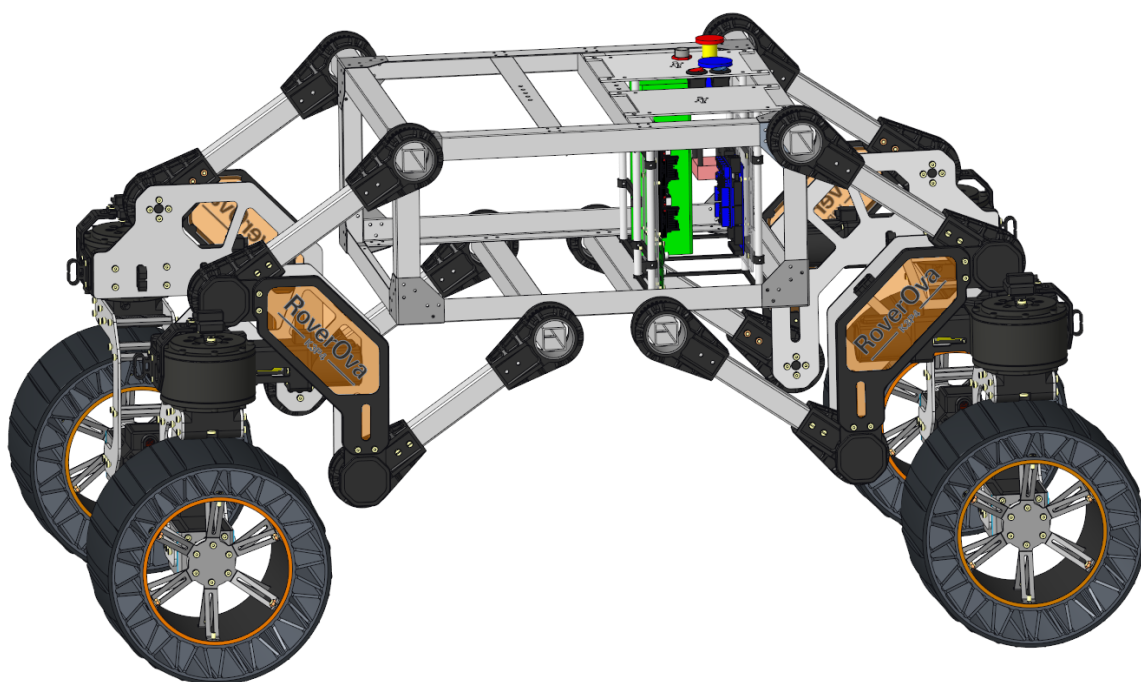
Po dosazení přepočtených hodnot do grafu momentové charakteristiky motoru můžeme vidět, že zvolený motor **vyhovuje** novým parametrům návrhového výpočtu.



Obr. 35 – Momentová charakteristika motoru MAXON EC 45 flat [10]

Konečný model kola, napojený na rám roveru a moduly s elektronikou je vidět na Obr. 36 – Kompletní 3D model kola napojeného na rám. Připojení paralelogramu ke konstrukci rámu a průměrový mechanismus odpružení již není součástí řešení diplomové práce, stejně tak boxy pro elektroniku jsou namodelovány pouze schematicky, jelikož jejich finální podoba a umístění záleží i na elektronice ostatních systémů roveru, které nejsou v diplomové práci uvedeny.

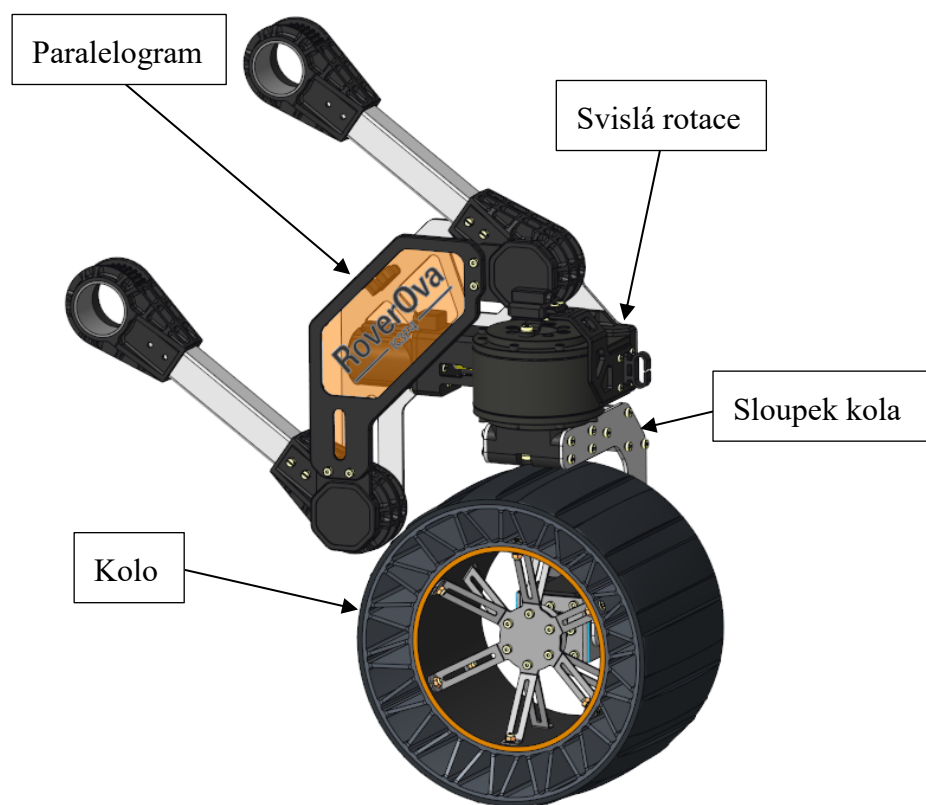
Maximální obrysové rozměry konstrukce jsou 1110 x 550 x 700 mm (Délka x Výška x Šířka).



Obr. 36 – Kompletní 3D model kola napojeného na rám

## 6.1 Konstrukce celku kola se svislou rotací

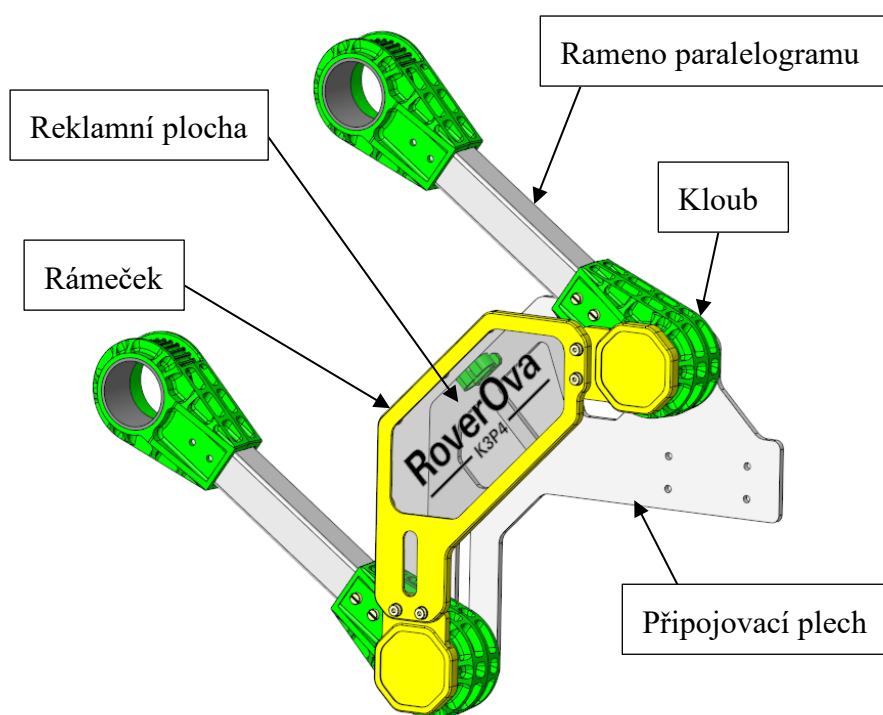
Konstrukce celého kola je rozdělena do 4 základních podsestav, podsestavy paralelogramu, podsestavy svislé rotace, podsestavy sloupku kola a podsestavy samotného kola (Obr. 37 – Konstrukce celku kola se svislou rotací). Sestava celku jednoho kola včetně ramen paralelogramu váží 6,62 Kg. Maximální obrysové rozměry bez ramen paralelogramu činí 268 x 420 x 225 mm (Délka x Výška x Šířka). Osa rotace kola se nenachází přímo v ose paralelogramu, ale je od ní vysunuta o 45 mm. Kolo se může otáčet libovolně o 360°.



Obr. 37 – Konstrukce celku kola se svislou rotací

## 6.2 Konstrukce paralelogramu

Paralelogram slouží jako část odpružení roveru, ke které je připojena svislá rotace s kolem. Spodní část paralelogramu se skládá z hliníkového plechu a tloušťce 4 mm, ke kterému je přišroubována svislá rotace. K tomuto plechu jsou také přišroubovány tištěné klouby (materiál PLA), na které se napojují ramena paralelogramu. Na konec náboje kloubů je nalepena tištěná krytka, ke které je přišroubován rámeček z tištěného z flexibilního filamentu (materiál TPU) který se v průmyslu používá například pro díly karoserie aut, ve kterém je tvarově uchyceno plexisklo sloužící jako reklamní plocha.



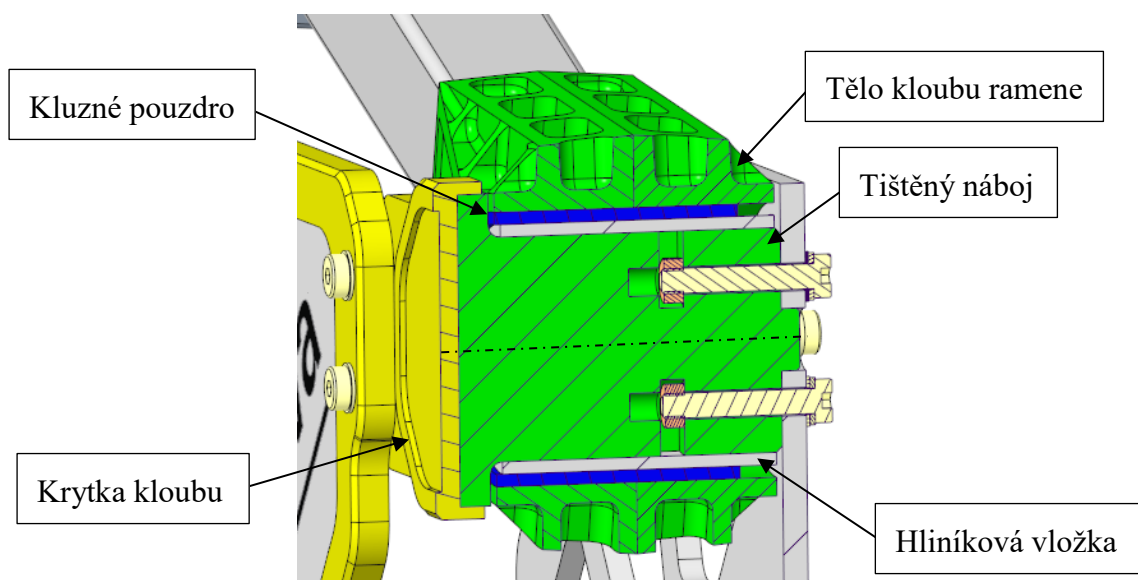
Obr. 38 – Paralelogram

Jelikož bude připojovací plech jednou z nejvíce namáhaných součástí celku kola, bude vyroben z tvrzené slitiny hliníku dle normy ČSN 42 4401 T66.

Tab. 26 – Mechanické vlastnosti ČSN 42 4401 T66

Veličina	Značení	Hodnota
Mez kluzu	R <sub>p</sub>	min. 200 Mpa
Mez pevnosti	R <sub>m</sub>	min. 245 Mpa
Tažnost	A%	8%
Modul pružnosti v tahu	E	68 Gpa
Modul pružnosti ve smyku	G	26 Gpa

Klouby, na kterých se otáčí ramena paralelogramu jsou k plechu přišroubovány pomocí čtyř šroubů M4 jištěných pružnou podložkou, kde v tištěném těle náboje jsou uloženy jako protikus matice. Na náboj je dále nasunuta hliníková vložka o tloušťce 2 mm, která slouží jako styková plocha pro plastové kluzné pouzdro uložené v tištěné části kloubu ramene. Samotné rameno je tvořeno čtvercovým hliníkovým profilem 25 mm (EN AW 6060 T66) [17].

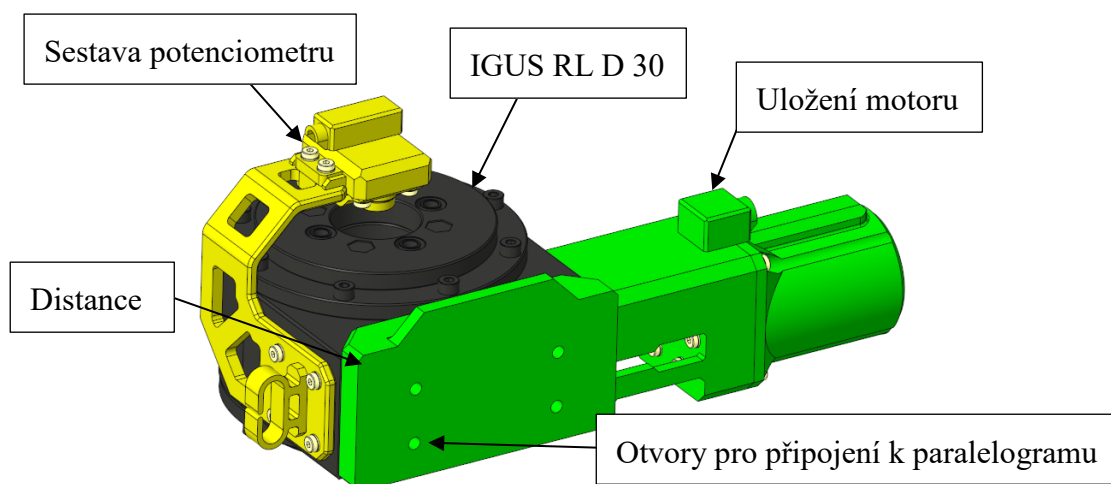


Obr. 39 – Řez kloubem paralelogramu

### 6.3 Konstrukce svislé rotace

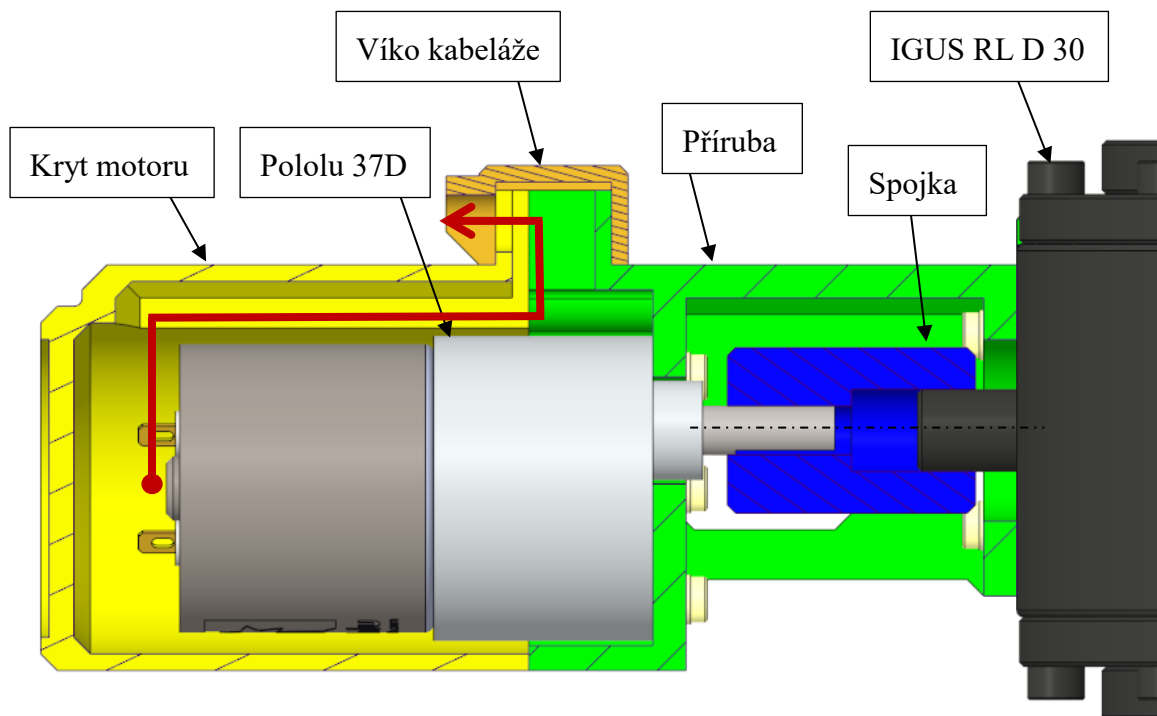
Základem svislé rotace je plastová šneková převodovka IGUS RL D 30 [14]. Svislá rotace je k paralelogramu přišroubována přes tištěnou distanční podložku do montážních závitových děr v převodovce. Z jedné strany je pak k převodovce přišroubován stojan, na kterém je umístěn magnetický potenciometr AS5040 [13] pro odměřování úhlu natočení kola. Z druhé strany je připojeno uložení s DC motorem Pololu 37D [15]. Přenos kroutícího momentu z motoru na převodovku je realizován pružnou spojkou.





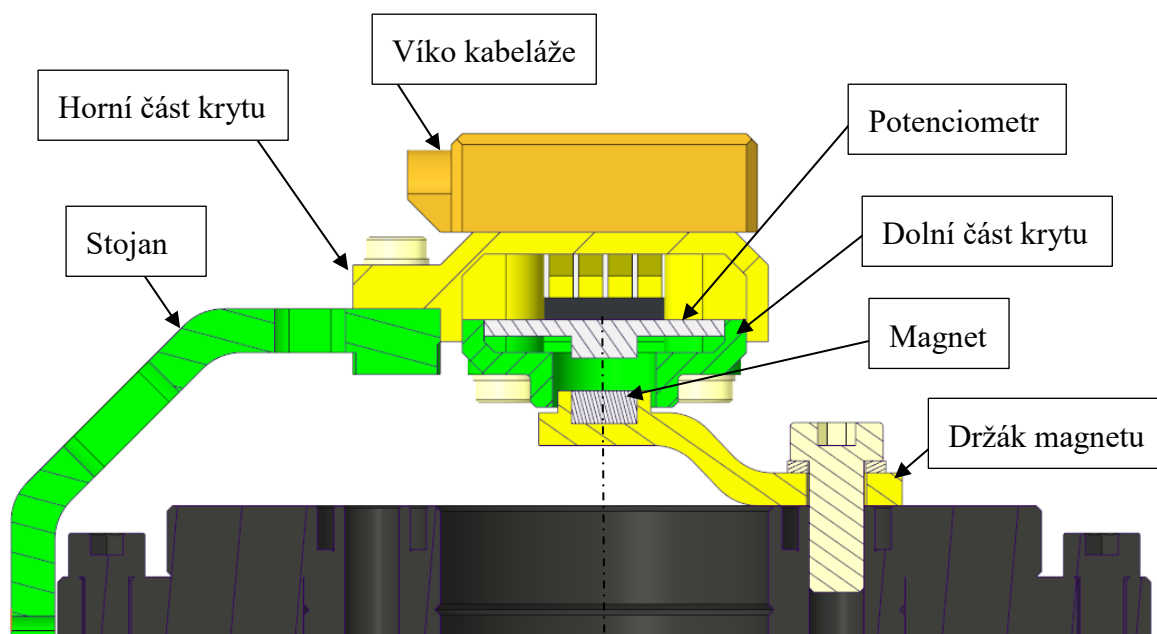
Obr. 40 – Svislá rotace

Uložení motoru je realizováno pomocí tištěného plastového dílu (materiál PLA), který funguje jako příruba spojující motor a převodovku. Jak už bylo řečeno dříve kroučící moment z motoru je na převodovku přenášen pomocí hliníkové pružné spojky StS WKE/NK 14 [18]. Aby se zajistilo požadovaného stupně krytí je motor zakrytován pomocí dalšího tištěného dílu. Otvor, kterým je z krytování vyvedena kabeláž motoru je zakryt tištěným víkem.



Obr. 41 – Řez uložením motoru svislé rotace

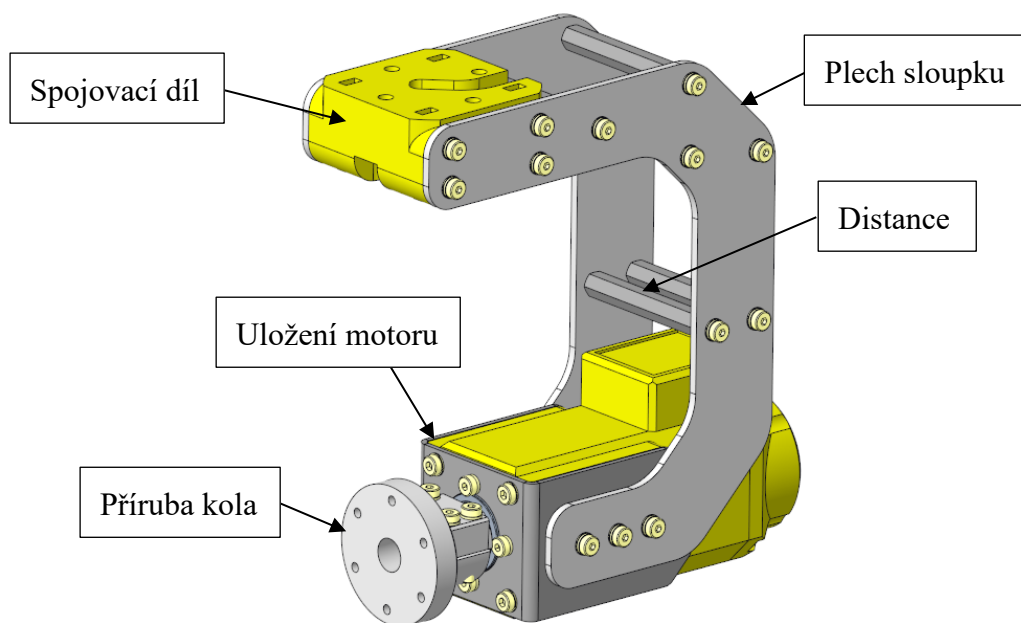
Magnetický potenciometr, kterým je měřena hodnota natočení kola je umístěn nad osu rotace převodovky. Potenciometr je přišroubován mezi dva do sebe zapadající tištěné díly tvořící jeho kryt. Kabeláž je vedena přes horní část krytování a stejně jako u krytování motoru je překryta víkem. K převodovce je potenciometr přišroubován z boku přes tištěný držák. Dále je k jednomu z otvorů v rotující části převodovky přišroubován držák s magnetkou, který se natáčí společně s kolem.



Obr. 42 – Řez sestavou potenciometru

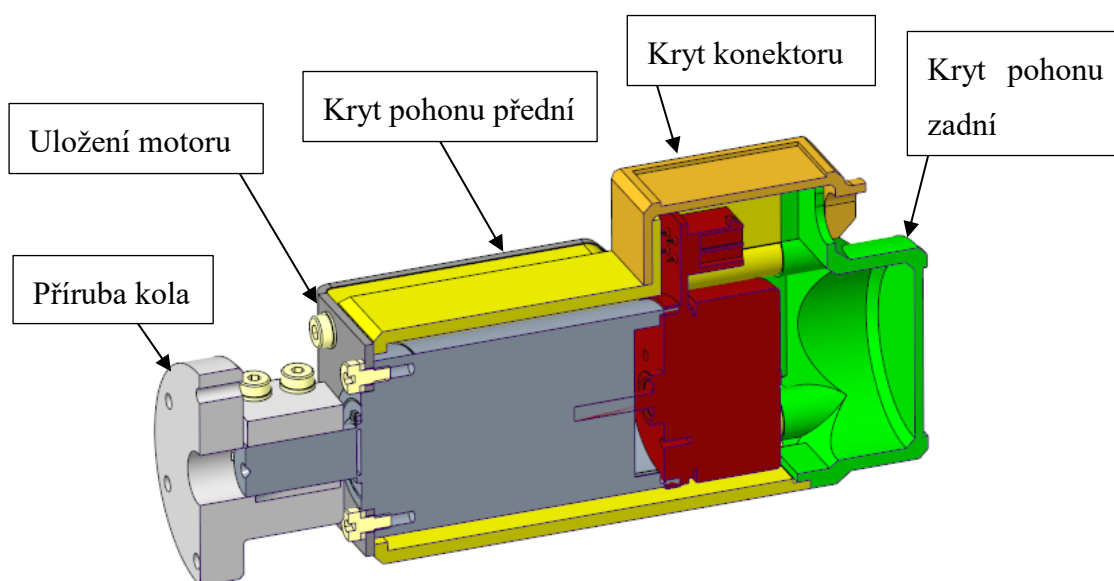
## 6.4 Konstrukce sloupku kola

Sloupek kola je tvořen ze dvou hliníkových plechů, které jsou k sobě přišroubovány přes celkem šest distančních sloupků. Hliníkové plechy sloupku jsou stejně jako plech paralelogramu vyrobeny ze slitiny hliníku dle normy ČSN 42 4401 T66. Z jedné strany je ke sloupku přišroubován plastový spojovací díl, přes který je sloupek s kolem přišroubován ke svislé rotaci. Z druhé strany je přišroubováno uložení pohonu kola. To je tvořeno ocelovým ohýbaným 2 mm plechem (Ocel 11 373) a krytáním. Na výstupním hřídeli převodovky je přes svěrný spoj chycena příruba pro napojení kola.



Obr. 43 – Sloupek kola

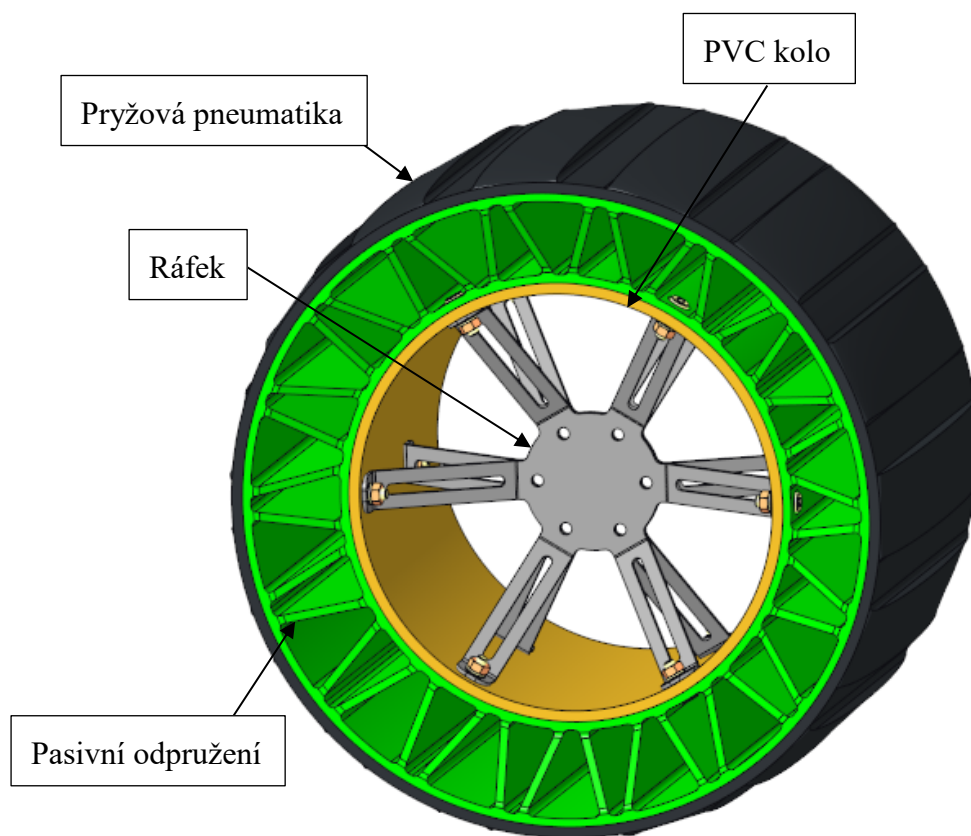
Pohonná jednotka kola je tvořená kombinací motoru Maxon EC 45 flat [10] a převodovky Maxon GP 42 C [10]. Pohon je přišroubován k uložení motoru přes přípojovací díry v převodovce. Pohon je zakrytý trojdílným krytím, které je stejně jako pohon přišroubováno k ocelovému plechu tvořícího uložení motoru pomocí čtyř šroubů. Příruba se svěrným spojem bude vyrobena jako všechny ostatní hliníkové díly se slitiny hliníku ČSN 42 4401 T66.



Obr. 44 – Řez uložením pohonu kola

## 6.5 Konstrukce kola

Základem kola je dvoudílný laserem řezaný a následně ohýbaný ráfek z 2 mm ocelového plechu (Ocel 11 373). Ten je přišroubovaný k PVC kolu, to je vyrobeno z nařezané normalizované odpadní trubky KG 150 mm / 0,5 m [19]. Na PVC kolo je dále nalepené pasivní odpružení v podobě tvarované pneumatiky vyrobené pomocí technologie FDM 3D tisku z Termoplastického Polyuretanu (TPU). Tvar a tloušťka a materiál pneumatiky byly inspirovány funkční pneumatikou Michelin Tweel [9]. Na pasivní odpružení je nalepena ještě jedna pryžová vrstva, která chrání povrch plastového tisku před terénem. Ke šroubům, kterými je přišroubován ráfek ke kolu se dá dostat skrze otvory v pneumatice odpružení. Kolo je připojeno k přírubě přes šest šroubů M4.

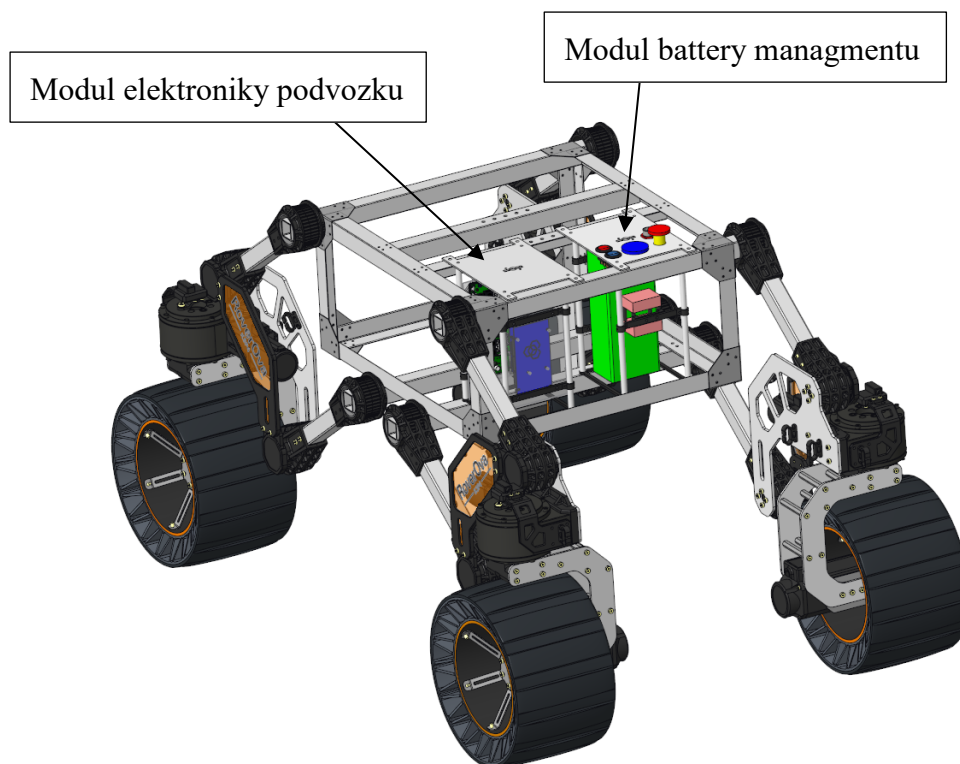


Obr. 45 - Kolo

## 7 Hardwarová struktura vybrané varianty

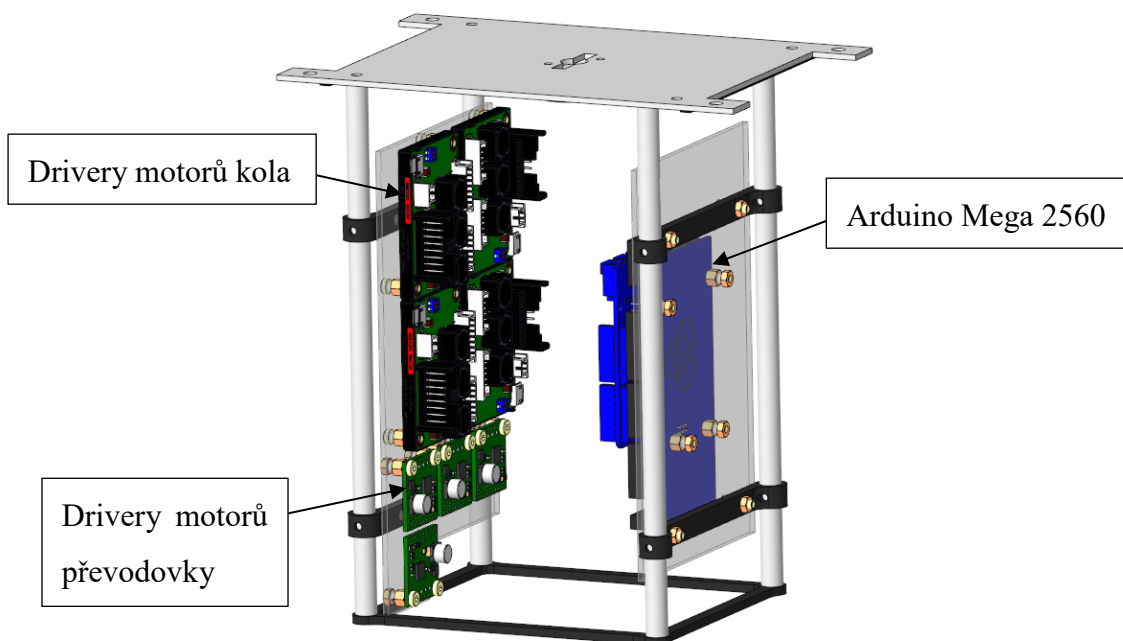
Pro uložení hardwarových komponent uvnitř rámu roveru, byly schematicky navrženy boxy pro modul elektroniky podvozku a battery managmentu. Jedná se pouze o koncept možného uložení elektroniky, reálně se bude v roveru nacházet mnoho dalších elektronických systémů, jejichž řešení není předmětem diplomové práce a které budou mít velký vliv na finální konstrukci boxů elektroniky.

Koncepčně jsou jednotlivé moduly navrženy jako zásuvné boxy, kde každý box bude představovat jeden elektronický systém, moduly se do rámu budou zasouvat seshora, kde budou umístěny i potřebné konektory pro propojení systémů, indikátory stavu, popřípadě ovládací tlačítka.



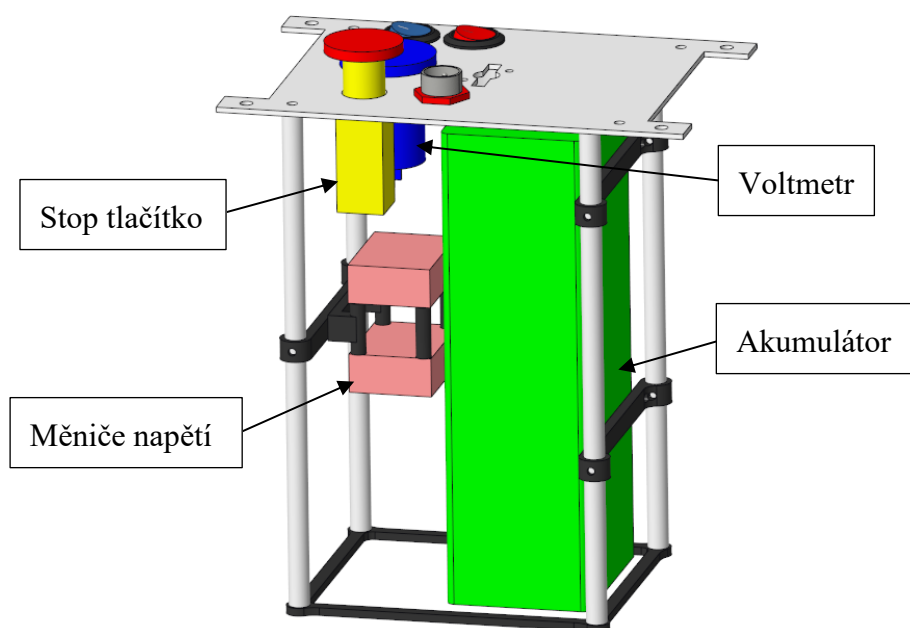
Obr. 46 – Umístění modulů elektroniky v rámu roveru

Modul elektroniky podvozku se skládá z řídicí jednotky Arduino Mega 2560 s nástavbou Sensor shield a driverů pro jednotlivé motory.



Obr. 47 – Modul elektroniky podvozku

Modul battery management obsahuje akumulátor, měniče napětí, voltmetr a stop tlačítko.



Obr. 48 – Modul battery managementu

## 7.1 Popis zvolených komponent

V této kapitole budou vypsány všechny zvolené výkonové a elektrické komponenty a jejich základní parametry.

### 7.1.1 Motor kola

Jako motor pro pohon kol byl dle návrhového výpočtu zvolen motor **Maxon EC 45 flat**  $\varnothing 42,8$  mm, brushless, 70 Watt, with Hall sensor [10].



Obr. 49 – Maxon EC 45 flat [10]

Tab. 27 – Parametry motoru Maxon EC 45 flat [10]

Parametr	Hodnota
Napětí	24 V
Nominální otáčky	4860 ot/min
Nominální moment	128 mNm
Nominální proud	3,21 A
Hmotnost	140 g
Cena	2 990 Kč

### 7.1.2 Převodovka pohonu kola

Ke zvolenému motoru kola byla dle návrhových výpočtů vybrána pasující převodovka **Maxon GP 42 C Ø42 mm, 3 – 15 Nm, Ceramic Version** [10].



Obr. 50 – Maxon GP 42 C [10]

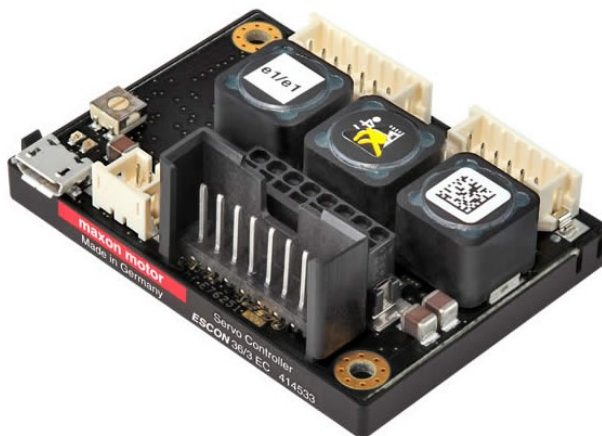
Tab. 28 – Parametry převodovky Maxon GP 42 C [10]

Parametr	Hodnota
Převodový poměr	126 / 1
Průměr výstupního hřídele	10 mm
Maximální nominální moment	15 Nm
Maximální krátkodobý moment	22 Nm
Účinnost	72%
Maximální převodový výkon	100 W
Maximální axiální síla	150 N
Maximální radiální síla	360 N
Maximální otáčky	8 000 ot/min
Hmotnost	460 g
Cena	6 443 Kč



### 7.1.3 Driver pro motory kola

Jako driver pro motor kola byl vybrán kontrolér **ESCON 36/3 EC, 4-Q Servocontroller for EC motors, 2.7/9 A, 10 – 36 VDC** [10]. Kontrolér dokáže ovládat EC motory maxon do výkonu okolo 100 Watt, a dokáže zpracovávat výstup z Hallovy sondy v motorech. Dokáže realizovat jak poziční, tak i požadované rychlostní řízení.



Obr. 51 – Kontrolér ESCON 36/3 [10]

Tab. 29 – Parametry kontroléru ESCON 36/3 [10]

Parametr	Hodnota
Operační napětí	10 - 36 V
Maximální výstupní proud	9 A
Digitální vstupy	2
Analogové vstupy	2
Digitální výstupy	2
Analogové výstupy	2
USB 2.0	Ano
Hmotnost	36 g
Cena	3 733 Kč

#### 7.1.4 Motor svislé rotace

Jako motor převodovky byl zvolen DC motor **Pololu Metal Gearmotor 37D x 54L 70:1 without encoder** [15].



Obr. 52 – Pololu 37D x 54L [15]

Tab. 30 – Parametry motoru Pololu 37D x 54L [15]

Parametr	Hodnota
Převod	70 : 1
Nominální otáčky	150 ot/min
Nominální moment	1,4 Nm
Napětí	6 - 12 V
Hmotnost	195 g
Cena	645 Kč

#### 7.1.5 Převodovka svislé rotace

Jako převodovka svislé rotace byla zvolena kvůli samosvornosti šneková převodovka **IGUS RL D 30 30-01** [14].



Obr. 53 – Převodovka IGUS RL D 30 [14]

Tab. 31 – Parametry IGUS RL D 30 [14]

Parametr	Hodnota
Převod	30 : 1
Účinnost	40 %
Výstupní moment	20 Nm
Brzdňý moment	80 Nm
Hmotnost	790 g
Cena	6 000 Kč

### 7.1.6 Driver pro motory svislé rotace

Jako driver pro motory svislé rotace byl vybrán driver **TB9051FTG Single Brushed DC Motor Driver Carrier** [20]. Pozičního řízení bude docíleno pomocí údajů z magnetického potenciometru, které bude zpracovávat řídicí jednotka.



Obr. 54 – Driver TB9051FTG [20]

Tab. 32 – Parametry driveru TB9051FTG [20]

Parametr	Hodnota
Operační napětí	4,5 - 28 V
Maximální proud	5 A
Max. PWM frekvence	20 kHz
Hmotnost	3,1 g
Cena	231 Kč

### 7.1.7 Potenciometry

Pro zjištění úhlu natočení kola byl zvolen magnetický rotační potenciometr **AS5040-EK-AB-ND** [13].



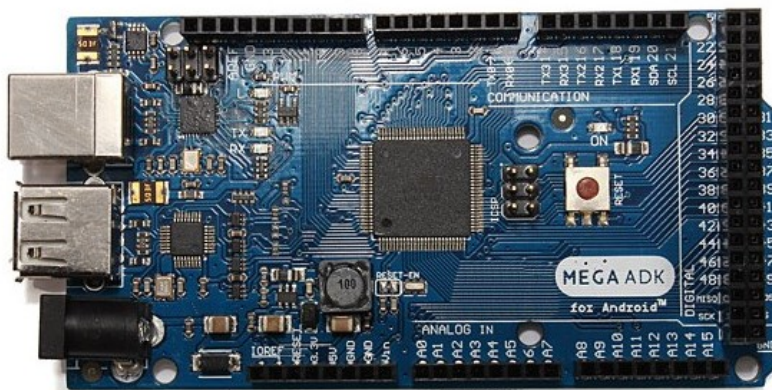
Obr. 55 – Potenciometr AS5040-EK-AB-ND [13]

Tab. 33 – Parametry potenciometru AS5040 [13]

Parametr	Hodnota
Typ senzoru	magnetický
Úhel snímání	360°
Interface	Sériový
Napětí	9 V
Čip	AS5040
Cena	438 Kč

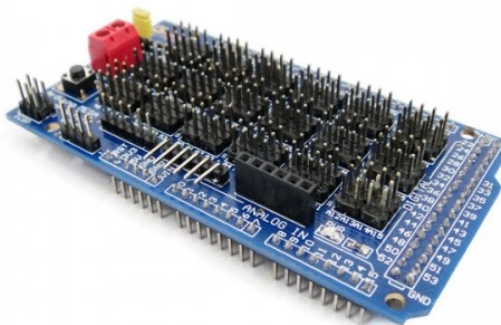
### 7.1.8 Řídicí jednotka

Jako řídicí jednotka byla zvolena vývojová deska **Arduino Mega 2560** [22] opatřená sensor shieldem pro zajištění dostatečného počtu analogových vstupů/výstupů.



Obr. 56 – Arduino Mega 2560 [22]

Arduino Mega 2560 má 16 analogových vstupů a 54 digitálních vstupů/výstupů, ze kterých je 15 PWM. Tento počet vstupů a výstupů by měl stačit, ale pro případ budoucího rozšíření systému byla přidána nastavba Shieldu pro Arduino Mega 2560 [21], která zvyšuje počet analogových vstupů na 32 a přidává dalších 54 digitálních vstupů/výstupů.



Obr. 57 – Sensor shield pro Arduino Mega 2560 [21]

Tab. 34 – Parametry Arduino Mega 2560 + Shield [22]

Parametr	Hodnota
Microkontrolér	ATmega2560
Operační napětí	5 V
Digitální I/O piny	54
Analogové I/O	16
Paměť flash	254 KB
Clock speed	16 MHz
Hmotnost	60 g
Cena	757 Kč

### 7.1.9 Akumulátor

Celý rover je napájen pomocí akumulátoru **Rc Lipo Battery 6S 22,2V 10Ah 30C XT60** [23]. I přes to že má akumulátor v popisku 22,2 V, tak plně nabitý dodává něco přes 24 V.



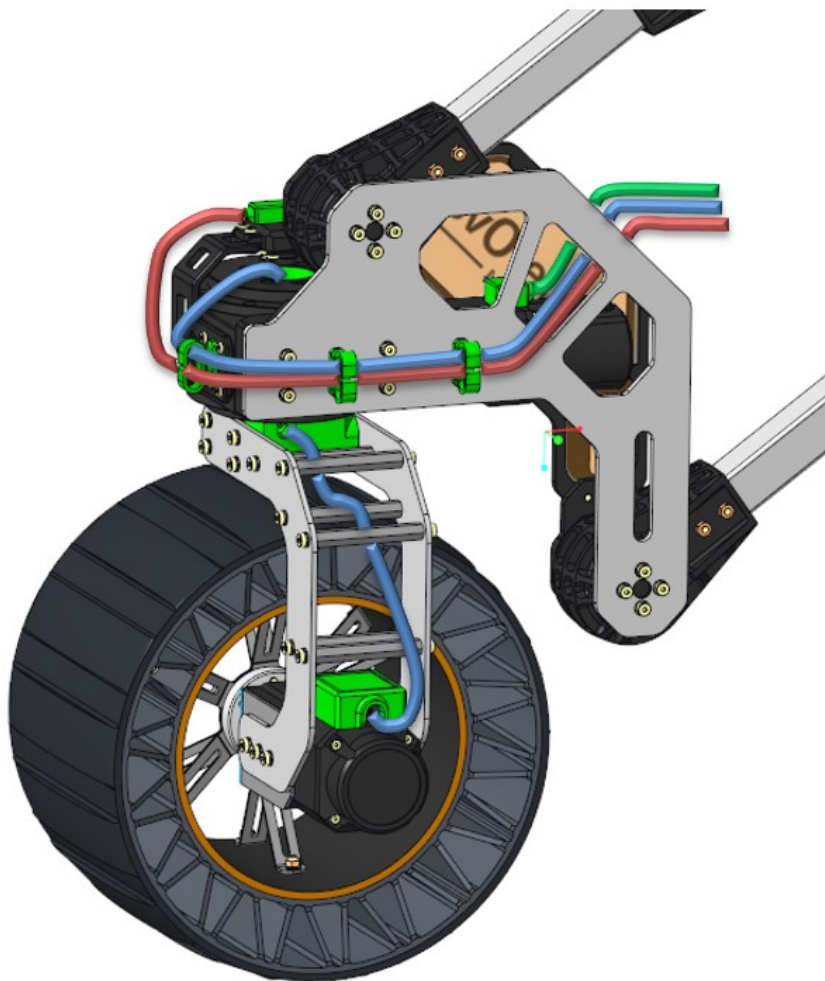
Obr. 58 – Akumulátor LiPo Rc 6S 22,2V 10Ah [23]

Tab. 35 – Parametry akumulátoru LiPo Rc 6S 22,2V 10Ah [23]

Parametr	Hodnota
Napětí	22,2 V (24 V)
Kapacita	10 000 mAh
Rychlost vybíjení	30C
Hmotnost	1 220 g
Cena	3 950 Kč

## 7.2 Trasy pro vedení kabeláže

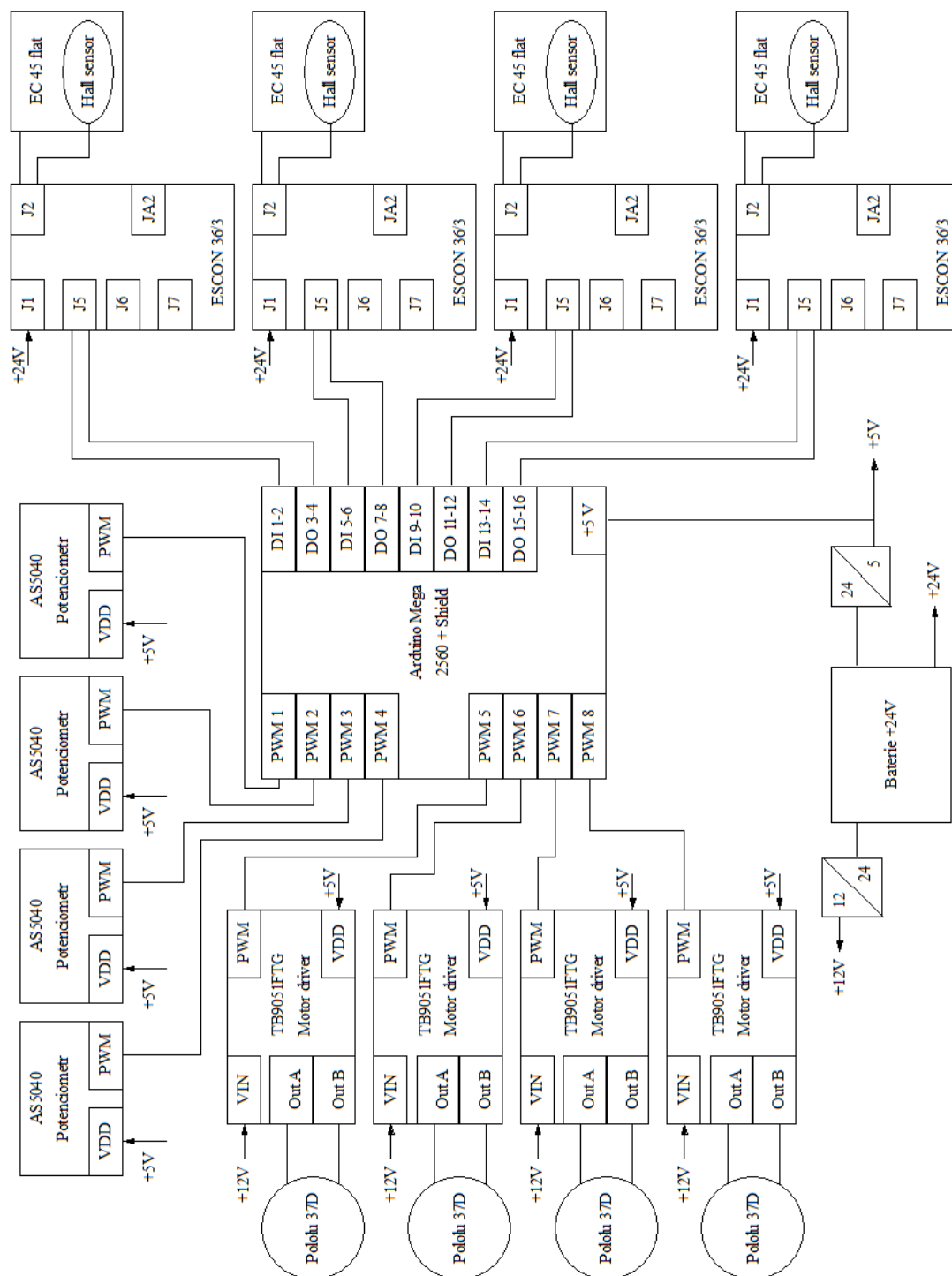
Kabeláž od pohonů a senzorů kola bude naváděna pomocí plastových tištěných úchytů, které budou nalepeny na konstrukci. Trasy navržené pro vedení kabeláže jsou uvedeny na Obr. 59 – Trasy pro vedení kabeláže. Zeleně je označena kabeláž pohonu svislé rotace, červeně kabeláž od senzoru natočení a červeně kabeláž od pohonu kola.



Obr. 59 – Trasy pro vedení kabeláže

### 7.3 Schéma zapojení

Pohony svislé rotace se řídí pomocí pulsní šířkové modulace (PWM), které vytváří řídicí jednotka. Stejně tak mají PWM výstup i magnetické potenciometry. Motory kola, řízené kontrolérem ESCON 36/3 komunikují s řídicí jednotkou přes 2 digitální vstupy a výstupy.



Obr. 60 – Schéma zapojení



## 8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout kolo s dvěma stupni volnosti pro mobilní robot katedry robotiky Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava RoverOva K3P4 určený do soutěže ERC Student. V úvodu práce byl přiblížen termín Mars rover a dále zpracován rozbor soutěže ERC Student a jejích úloh. Nechybí také popis konstrukce a poznatků načerpaných z předchozího stavu konstrukce robotu, z nichž společně s pravidly soutěže vzešly parametry do požadavkového listu.

Byly navrženy celkem tři varianty kola a svislé rotace, které se od sebe liší především typem pohonných jednotek kola a rotace, přenosu momentu na kolo, konstrukce kola a typem pasivního odpružení. Pomocí vícekritériální analýzy byla jako optimální varianta k dalšímu detailnímu rozpracování kombinace kola připevněného přímo na hřídel převodovky varianty A a kupované plastové šnekové převodovky svislé rotace varianty B.

Finální varianta kola a svislé rotace společně s částí paralelogramu odpružení váží 6,62 Kg. Po připojení kola k rámu jsou maximální rozměry robotu 1110 x 550 x 700 mm. Při návrhu kola byla hojně využita technologie FDM 3D tisku plastových dílů, které disponují snadnou výrobou, možností komplexních tvarů a malých hmotností.

Pro rychlostní řízení podvozku jsou v motorech kola zabudovány Hallovy sondy, z jejich výstupů dostáváme údaje o aktuální rychlosti. Poziční řízení natáčení svislé rotace je realizováno výstupem z magnetického potenciometru umístěného v ose šnekového kola, který snímá hodnotu aktuálního natočení kola a tu posílá pro do řídicí jednotky, která ovládá motory.

Jelikož se bude robot pohybovat ve členitém terénu, je vhodné, aby byl podvozek pasivně odpružen proti rázům. To je realizováno tvarem pneumatiky inspirované pneumatikou Michelin Tweel. Pružný člen pneumatiky je vyroben pomocí již zmíněné technologie FDM 3D tisku a to z flexibilního Termoplastického Polyuretanu.

Pro elektroniku podvozku, která se bude nacházet uvnitř rámu konstrukce, byl navržen koncept možného uložení do zásuvných modulů. Byl navržen schématický model modulu elektroniky podvozku, ve kterém se nachází řídicí jednotka a drivery motorů a model modulu baterie, ve kterém jak už značí název je umístěn akumulátor společně s měniči napětí, voltmetrem a stop tlačítkem. Návrh modulů je doplněn i schématem zapojení.

## Seznam použité literatury

- [1] Mars rover - Wikipedia. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mars\\_rover](https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_rover)
- [2] Planety - Mars - Mars Exploration Rovers. [online]. Copyright © 2009 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <http://planety.astro.cz/mars/2413-mars-exploration-rovers>
- [3] Matthew J. Roman. Design and Analysis of a Four Wheeled Planetary Rover. Oklahoma, 2005. Diplomová práce. University of Oklahoma graduate college.
- [4] ERC Student rules – ERC. [online]. Dostupné z: [http://roverchallenge.eu/wp-content/uploads/2019/01/Rules\\_Student2019-1.pdf?fbclid=IwAR2AxFEcronNZVIMa\\_BvFDush8SH3omO-3DkjOfJL7876IK6Ig3Cbsaon5c](http://roverchallenge.eu/wp-content/uploads/2019/01/Rules_Student2019-1.pdf?fbclid=IwAR2AxFEcronNZVIMa_BvFDush8SH3omO-3DkjOfJL7876IK6Ig3Cbsaon5c)
- [5] K3P4 - mobilní robot katedry | Katedra robotiky. Katedra robotiky [online]. Copyright © Katedra robotiky 2008 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <http://robot.vsb.cz/mobilni-roboty/k3p4/>
- [6] File:Rocker bogie.gif - Wikimedia Commons. [online]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rocker\\_bogie.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rocker_bogie.gif)
- [7] Foto z ERC Student, Autor Ing. Petr Široký, Ing. Robert Pastor, Bc. Jan Johech
- [8] MIHOLA, Milan. Návrh a analýza lokomočního subsystému servisního robotu pro pohyb ve členitém terénu. Ostrava, 2011. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technické univerzita Ostrava.
- [9] Welcome to Michelin Tweel Technologies. Welcome to Michelin Tweel Technologies [online]. Copyright © MICHELIN 2012 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.michelintweel.com/>
- [10] Maxon - Online Shop. Maxon motor [online]. Dostupné z: <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/>
- [11] Nema 23 stepper motor. Stepper-motor.eu [online]. Copyright © VIENNA [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.stepper-motor.eu/krokovye-motory/nema-23/stepper-motor,nema-23,m1233051>
- [12] Šneková soukolí. eshop.ameco.cz [online]. Copyright © 2014 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <http://eshop.ameco.cz/produkty/Osova-vzdialenost-35mm>
- [13] AS5040. Digikey.cz [online]. Dostupné z: [https://www.digikey.cz/product-detail/en/ams/AS5040-SS\\_EK\\_AB/AS5040-EK-AB-ND/2339617](https://www.digikey.cz/product-detail/en/ams/AS5040-SS_EK_AB/AS5040-EK-AB-ND/2339617)
- [14] Robolink® D low cost robot joint, size 30, Igus.cz [online]. Dostupné z: <https://www.igus.cz/product/1399>

- 
- [15] Pololu - 100:1 Metal Gearmotor 37Dx57L mm. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1106/specs>
- [16] FHA-Mini Compact Hollow Shaft Servo Actuator | Harmonic Drive. Harmonic Drive® High Precision Gear | Harmonic Drive [online]. Copyright © 2019 Harmonic Drive LLC [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/products/rotary-actuators/hollow-shaft-actuators/fha-mini>
- [17] Hliníkový jelek 25X15X1.5. Hliníkové profily, hliníkové plechy e-shop [online]. Copyright © 2019 Hliníkové profily, hliníkové plechy [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinikovy-jelek-25x15x1-5/pro-Q1T0000101.html>
- [18] Řada WKE/NK | RAVEO s.r.o. RAVEO s.r.o. | WORLD OF MOTION [online]. Copyright © [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/elastomero-vespojky/WKE-NK>
- [19] Kanalizační trubka KG odpadní Ø 150 / 0,5 m. Nonstopstavebniny.cz [online]. Copyright © Copyright 2013 NONOSTOPSTAVEBNINY [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.nonstopstavebniny.cz/6882-kanalizacni-trubka-kg-odpadni-oe-150-0-5-m.html>
- [20] Pololu - TB9051FTG Single Brushed DC Motor Driver Carrier. Pololu Robotics and Electronics [online]. Copyright © 2001 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2997>
- [21] Arduino Mega Senzor Shield v2.0. Santy.cz [online]. Copyright © Santy.cz [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: <https://www.santy.cz/shieldy-pro-arduino-c23/arduino-mega-senzor-shield-i10/>
- [22] Arduino - ArduinoBoardMega2560 . Arduino [online]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560/>
- [23] Akumulátor Rc Lipo Battery 6S 22.2V 10000MAH 30C XT60 Plug For RC Helicopter Quadcopter FPV Drone UAV - Battery, Batterie, Záložní zdroje, UPS. [online]. Copyright © 2019 [cit. 14.05.2019]. Dostupné z: [http://battery.nabizi.cz/akumulator-rc-lipo-battery-6s-22-2v-10000mah-30c-xt60-plug-for-rc-helicopter-quadcopter-fpv-drone-uav\\_p85832/](http://battery.nabizi.cz/akumulator-rc-lipo-battery-6s-22-2v-10000mah-30c-xt60-plug-for-rc-helicopter-quadcopter-fpv-drone-uav_p85832/)

## Přílohy

Příloha A: Pevnostní analýzy

Příloha B: Výpočet svěrného spoje

Příloha C: Výkresová dokumentace

- Sestavný výkres celku kola
- Sestavný výkres sloupku kola
- Sestavný výkres svislé rotace
- Výrobní výkres plechu uložení motoru

Příloha D: CD – Zdeněk Zeman – Diplomová práce 2018/2019

Obsah CD:

- Diplomová práce ve formátu PDF a DOCX
- Modely variant ve formátu .stp
- Výsledný 3D model v programu PTC Creo 4.0
- Výkresová dokumentace